4

CABLES ELÉCTRICOS PARA DISTRIBUCIÓN SUBTERRÁNEA

INTRODUCCIÓN

Un cable eléctrico está constituido por una parte metálica que permite el transporte de la corriente, llamada también el ***alma conductora***, y de una cubierta concéntrica de materiales que permiten el aislamiento o la protección mecánica.

CONDUCTOR

Un conductor es la designación que se da al conjunto constituido de un alma conductora y de una cubierta aislante.

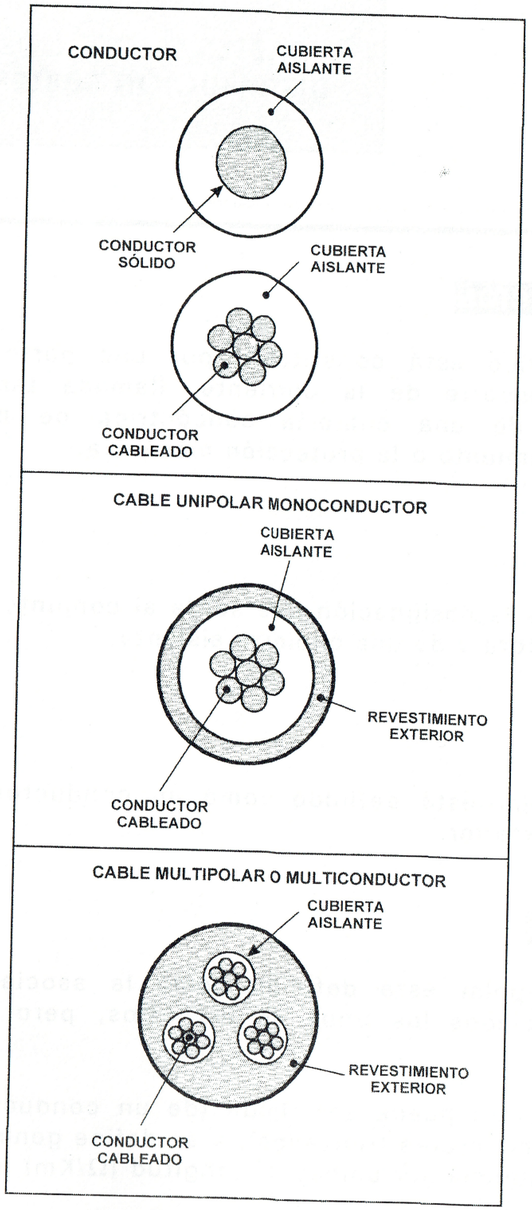
CABLE UNIPOLAR

Un cable unipolar está definido como un conductor que tiene un revestimiento exterior.

CABLE MULTIPOLAR

Un cable multipolar está definido como la asociación de varios conductores aislados los unos de los otros, pero mecánicamente sólidos.

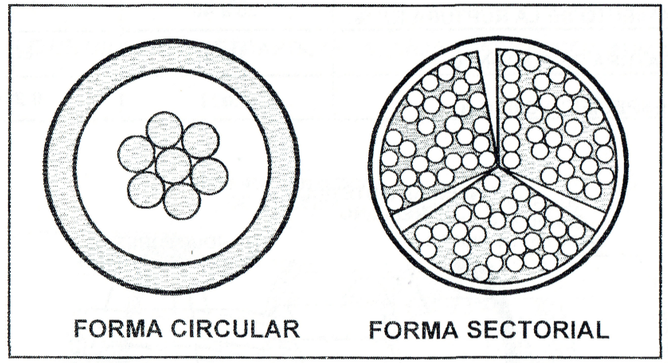
El alma conductora puede ser rígida (de un conductor) o cableada (varios hilos conductores trenzados), y se define generalmente por su clase y su resistencia por unidad de longitud (Ω/Km) a 20°C.



La cubierta montada sobre el alma conductora permite la creación de una superficie equipotencial que amortigua los efectos de la concentración y del campo eléctrico del conductor. Una cubierta montada sobre la cubierta aislante permite la puesta a tierra del cable en caso de fallas, el drene o conducción de las corrientes capacitivas y de cortocircuito.

La funda estañada permite la protección del cable contra la penetración del agua o líquidos, y esta funda está a su vez protegida por una armadura, ésta permite la protección mecánica del cable contra los choques o impactos.

La funda de protección protege al conjunto de elementos del cable contra las agresiones del medio exterior.

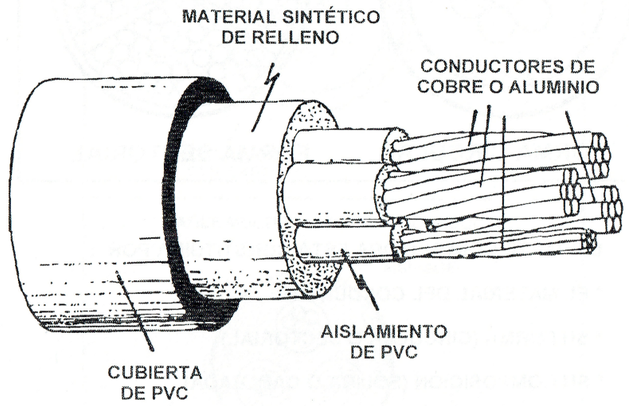


LA PARTE CONDUCTORA ESTÁ CONSTITUIDA POR :

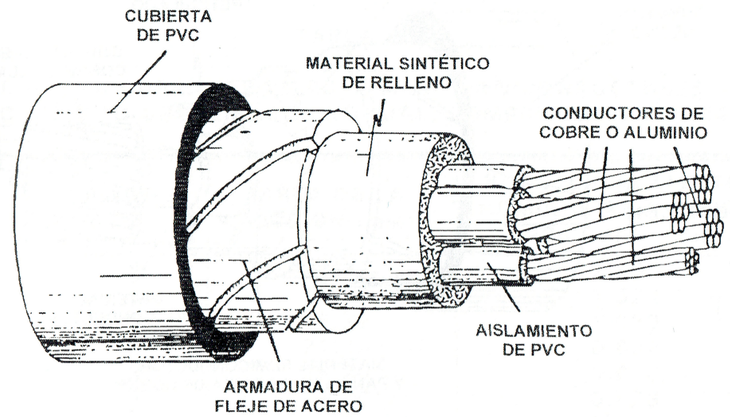
* EL MATERIAL DEL CONDUCTOR
* SU FORMA (CIRCULAR O SECTORIAL)
* SU COMPOSICIÓN (SÓLIDA O CABLEADA)
* LA SECCIÓN O CALIBRE (AWG,, KCM ó mm^2)
* SU RESISTENCIA LINEAL Y FLEXIBILIDAD

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

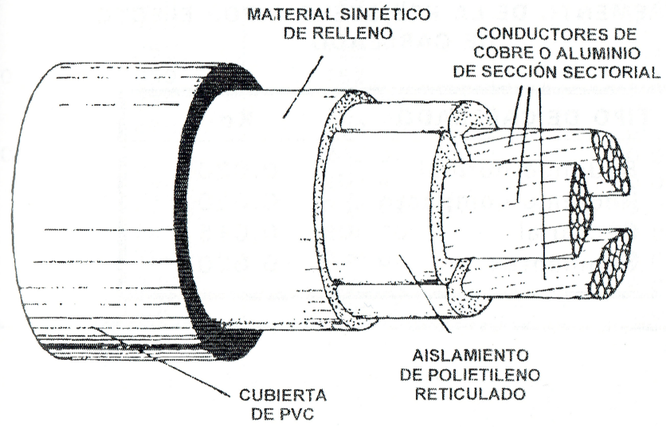
	COBRE	ALUMINIO
ESTADO	RECOCIDO	¾ DE DUREZA
GRADO DE PUREZA EN %	> 99.9	> 99.5
RESISTIVIDAD A 20°C EN $M\Omega mm^2/m$	17.241	28.264
COEFICIENTE DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA CON LA TEMPERATURA A 20°C POR °C	3.93×10^{-3}	4.03×10^{-3}
DENSIDAD	8.89	2.70
CARGA A LA RUPTURA N/mm^2	230 a 250	120 a150
ALARGAMIENTO DE LA RUPTURA EN %	20 a 40	1 a 4
TEMPERATURA DE FUSIÓN °C	1083	658
CALOR ESPECÍFICO Cal/°C-g	0.093	0.216



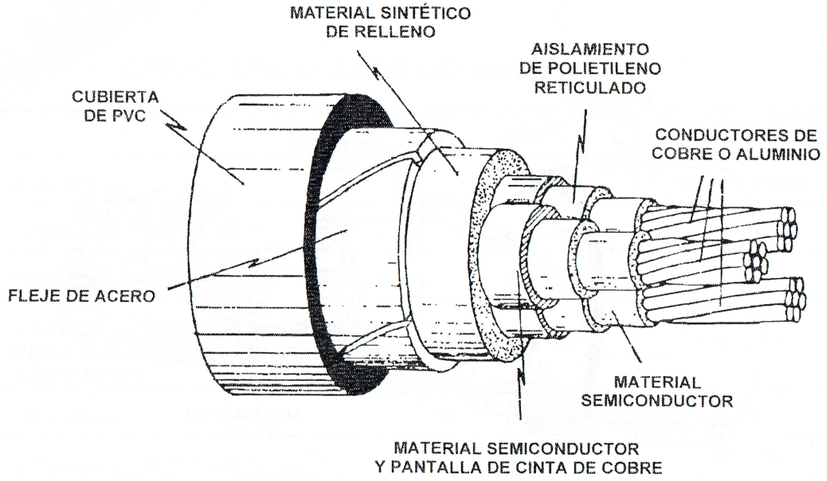
DETALLE DE UN CABLE TETRAPOLAR DE BAJA TENSIÓN



DETALLE DE UN CABLE TETRAPOLAR DE BAJA TENSIÓN CON ARMADURA



DETALLE DE UN CABLE TRIPOLAR DE BAJA TENSIÓN CON CONDUCTORES SECTORIALES



DETALLE DE UN CABLE TRIPOLAR DE MEDIA TENSIÓN

TABLA 4.1
INCREMENTO DE LA RESISTENCIA POR EFECTO DE CABLEADO

TIPO DE CABLEADO	Kc
Redondo normal	0.020
Redondo compacto	0.020
Sectorial	0.015
Segmental	0.020

TABLA 4.2

RESISTENCIA A LA CORRIENTE DIRECTA A 20°C EN CONDUCTORES DE COBRE CON CABLEADO CONCÉNTRICO NORMAL, COMPRIMIDO Y COMPACTO

mm^2	AWG MCM	AREA DE LA SECCIÓN (mm^2)	RESISTENCIA ELÉCTRICA NOMINAL A LA CD (20°C) (Cu SUAVE) ΩKm
	8	8.37	2.10
	6	13.30	1.322
	5	16.77	1.050
	4	21.15	0.832
	3	26.70	0.660
	2	33.60	0.523
35		34.89	0.504
	1	42.41	0.415
50		48.30	0.364
	1/0	53.50	0.329
	2/0	67.43	0.261
70		69.00	0.255
	3/0	85.00	0.207
	4/0	107.21	0.164
	250	126.70	0.139
150	300	152.01	0.116
	350	177.34	0.0992
	400	202.70	0.0867
240		242.50	0.0726
	500	253.4	0.0694
	600	304.02	0.0578
	700	354.70	0.0496
	750	380.02	0.0463
	800	405.36	0.0434
	1000	506.7	0.0347

TABLA 4.3

RESISTENCIA A LA CORRIENTE DIRECTA A 20°C EN CONDUCTORES DE ALUMINIO CON CABLEADO CONCÉNTRICO NORMAL, COMPRIMIDO Y COMPACTO

DESIGNACIÓN AWG MCM	ÁREA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL (mm^2)	RESISTENCIA ELÉCTRICA NOMINAL A LA CD OHM/KM A 20°C
2	33.6	0.860
1/0	53.5	0.539
2/0	67.4	0.428
3/0	85.0	0.3391
4/0	107.2	0.269
250	126.7	0.228
350	177.3	0.163
500	253.4	0.114
600	304.0	0.0948
700	354.7	0.0813
1000	506.7	0.0569

TABLA 4.4

FACTORES DE CORRECCIÓN POR TEMPERATURA PARA CÁLCULO DE RESISTENCIAS DE CONDUCTORES ELÉCTRICOS DE COBRE Y ALUMINIO

TEMPERATURA DEL CONDUCTOR EN °C	FACTOR DE CORRECCIÓN A 20°C	
	COBRE	ALUMINIO
0	1.085	1.088
5	1.062	1.064
10	1.040	1.042
15	1.020	1.020
20	1.000	1.000
25	0.980	0.980
30	0.962	0.961
35	0.944	0.943
40	0.927	0.925
45	0.910	0.908
50	0.894	0.892
55	0.879	0.876
60	0.869	0.861
65	0.850	0.846
70	0.836	0.832
75	0.822	0.818
80	0.809	0.805
85	0.796	0.792
90	0.784	0.780

TABLA 4.5

RAZÓN DE RESISTENCIAS, C.A./C.D., PARA CONDUCTORES DE COBRE Y ALUMINIO A UNA FRECUENCIA DE 60 CPS. CABLEADO CONCÉNTRICO NORMAL

CALIBRE CONDUCTOR AWG O MCM	PARA CUBIERTAS NO METÁLICAS. VÉASE NOTA 1		PARA CABLES CON CUBIERTAS METÁLICAS. VÉASE NOTA 2	
	1		2	
	COBRE	ALUMINIO	COBRE	ALUMINIO
3 y menores	1.000	1.000	1.00	1.00
2	1.000	1.000	1.01	1.00
1	1.000	1.000	1.01	1.00
1/0	1.001	1.000	1.02	1.00
2/0	1.001	1.001	1.03	1.00
3/0	1.002	1.001	1.04	1.01
4/0	1.004	1.001	1.05	1.01
250	1.005	1.002	1.06	1.02
300	1.006	1.003	1.07	1.02
350	1.009	1.004	1.08	1.03
400	1.011	1.005	1.10	1.04
500	1.018	1.007	1.13	1.06
600	1.025	1.010	1.16	1.08
750	1.039	1.015	1.21	1.11
1000	1.067	1.026	--	1.19
1250	1.102	1.040	--	1.27
1500	1.142	1.058	--	1.36
1750	1.185	1.079	--	1.46
2000	1.233	1.100	--	1.56
2500	1.326	--	--	--

Nota 1. Usar la columna 1 para la razón c.a./c.d. para:

A) Conductor monofásico con cubierta no metálica, instalado en aire o en ducto no metálico.
B) Conductor monofásico con cubierta metálica, instalado con las cubiertas aisladas en aire o en ductos no metálicos separados.

La columna 1 incluye únicamente el efecto piel o superficial (skin). Por lo general, se pueden despreciar los factores de proximidad que varían con el espaciamiento, para instalaciones espaciadas en forma uniforme.

Nota 2. Usar la columna 2 para la razón c.a./c.d. para:

A) Cables multiconductores con cubierta metálica.
B) Cables multiconductores con cubierta no metálica en conduit metálico.
C) Dos o múltiplo de dos conductores monofásicos con cubierta no metálica, instalados en el mismo conduit metálico.
D) Cables multiconductores con cubiertas no metálicas, instalados al aire o en conduit no metálico.

La columna 2 incluye la corrección por efecto superficial o piel (skin), de proximidad y todas las otras pérdidas inductivas de corriente alterna.

4.2 CUBIERTA AISLANTE, FUNDA Y ARMADURA

Los materiales usados para la cubierta aislante, se dividen en dos categorías principalmente:

- **Los plastómeros o termoplásticos,** en donde el estado físico evoluciona según la temperatura y su reblandecimiento y su deformación bajo los efectos de doblado mecánico. Los principales aislantes son el **policloruro de vinilo** (PVC) y el polietileno (PE), para las fundas se usan: El policropeno (PCP), el polietileno cloro azufrado (CSM), el polietileno clorado (CPE), así como materiales a base de acrílico.

  Los elastímeros y polímeros reticulables que soportan las restricciones mecánicas y en donde su estado físico está fijado por la vulcanización o reticulación.

  Los principales aislantes están hechos a base de Etileno-propileno (EPR), o bien polietileno reticular (PR).

4.3 FUNDAS INTERIORES

Estas aseguran la protección del cable y se oponen a cualquier contacto entre el agua y los agentes químicos exteriores y la envolvente aislante.

El medio de protección se obtiene mediante el empleo de una funda de plomo, pero también en muchos casos una malla puede ser suficiente para obtener la misma función, por medio de materiales sintéticos que juegan igualmente el papel de funda protectora.

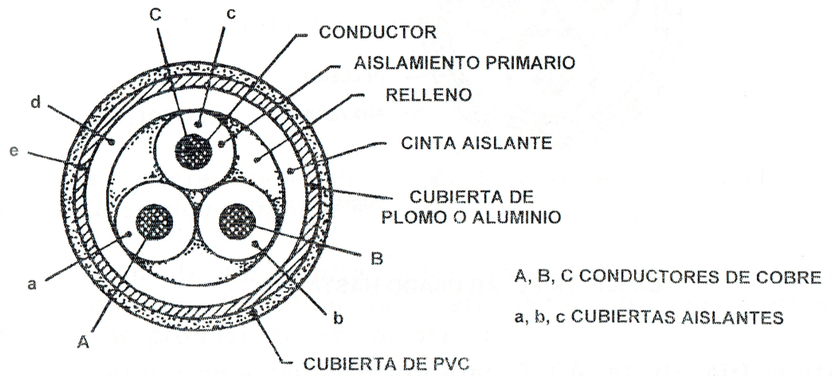
4.4 PRINCIPALES MATERIALES USADOS

Policloruro de vinilo (PVC)

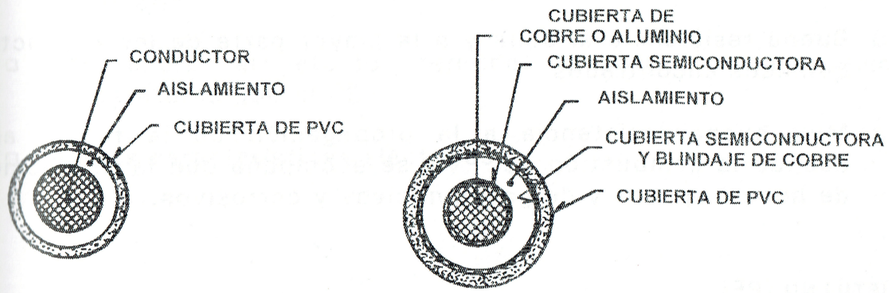
Tiene buenas características eléctricas: Rigidez y resistencia de aislamiento, por otra parte, las pérdidas dieléctricas son también

importantes y pueden llegar a ser críticas en media tensión, la inducción específica y la capacitancia lineal son también elevadas.

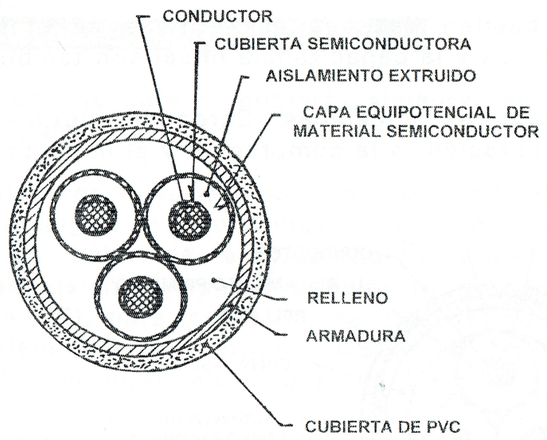
Buenas características mecánicas: Carga de ruptura, alargamiento, resistencia a la abrasión, a la compresión y al impacto.



SECCIÓN DE UN CABLE DE MEDIA TENSIÓN



CABLES USADOS HASTA 1 kV DE TIPO MONOPOLAR



CABLE TRIPOLAR USADO HASTA 1 kV

Soporte al frío: Hasta -40°C para los materiales corrientes.

Buena resistencia al efecto térmico: Los materiales usuales están preparados para una temperatura máxima en régimen permanente de 70°C.

- Buena resistencia al agua y a la mayor parte de los productos químicos encontrados.
- Muy buena resistencia a la propagación de la flama, aún cuando la combustión del PVC se acompaña con la producción de humos opacos y de gases nocivos y corrosivos.

Polietileno (PE)

Su demanda de uso se encuentra principalmente en baja y media tensión hasta 30 KV y alta tensión hasta 90 KV.

Muy buenas características eléctricas, la resistencia de aislamiento y la rigidez dieléctrica son muy elevadas.

Características mecánicas. Buena resistencia al impacto y protección a los rayos solares.

Tiene buena resistencia al agua y a la mayor parte de los productos químicos encontrados.

Una resistencia confiable a la propagación de la flama, que puede atenuar la propagación de gases corrosivos.

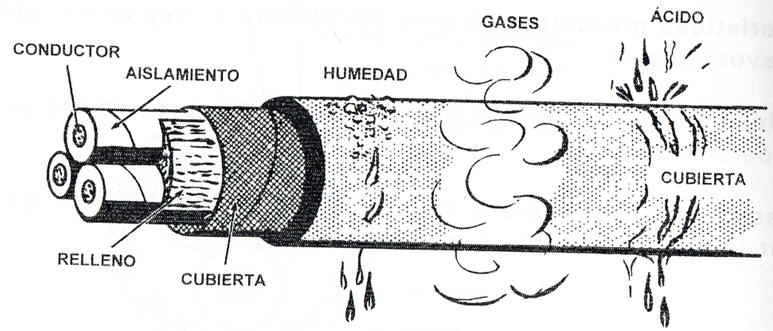
Polietileno reticular

Muy buenas características eléctricas: La resistencia de aislamiento y la rigidez dieléctrica son muy elevadas.

La reticulación de PE aporta sobre todo una estabilidad de las características mecánicas o las variaciones de temperatura. Su combustión no produce gases corrosivos.

Copolímeros etileno-propileno (EPR)

- Gran resistencia al oxígeno, al ozono y a otros elementos en la intemperie.
- Resistencia al efecto térmico, soportando las mismas temperaturas que el PE.
- Buenas características eléctricas.



LA PROTECCIÓN DE LOS CABLES SUBTERRÁNEOS SE DA POR MEDIO DE LA CUBIERTA

El comportamiento de los materiales aislantes debe satisfacer ciertos requerimientos ante riesgos físicos y químicos, como son:

- Al impacto, a la abrasión, al fuego, al doblez, al efecto de intemperie, al ozono, a los ácidos y los químicos, como son: resistencia a los ácidos, como el caso del ácido sulfúrico, acético y nítrico. A las bases, como: el amoniaco y sodio. A los hidrocarburos, como: aceites minerales, aromáticos, gasolina y alcohol.

4.5 CABLES DE ALTA TENSION

CABLES CON CAMPO NO RADIAL

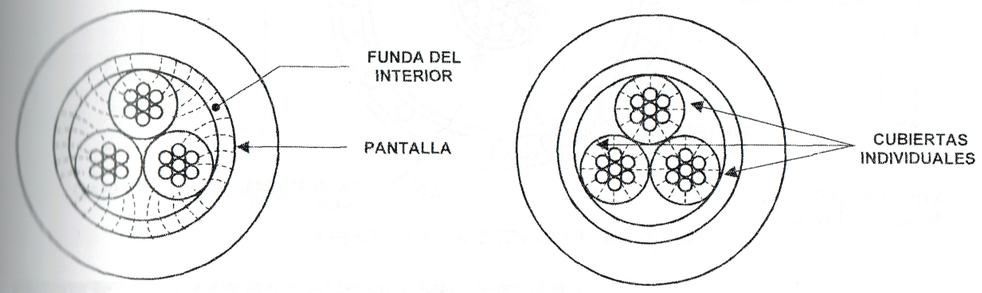
Debido a que en un cable multipolar los conductores están recubiertos por una pantalla única, se les denomina cables con **campo no radial**.

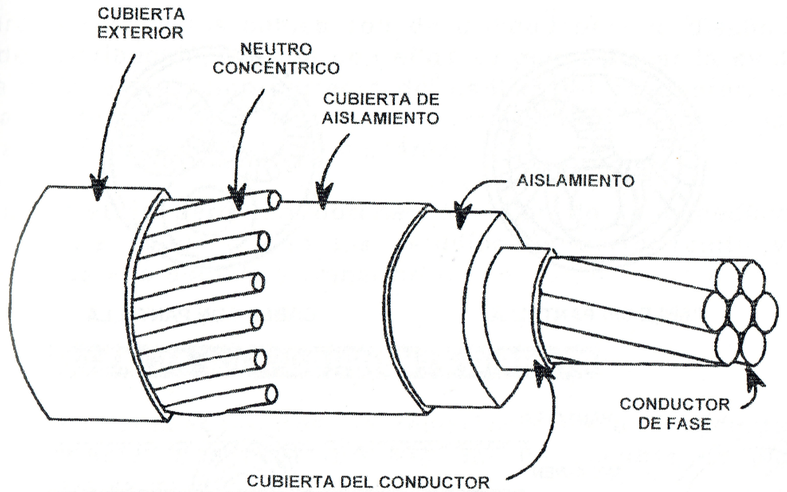
El campo eléctrico dentro del aislante es variable en dirección y amplitud.

Esta repartición variable impone una componente tangencial de campo que limita la tensión de operación del cable.

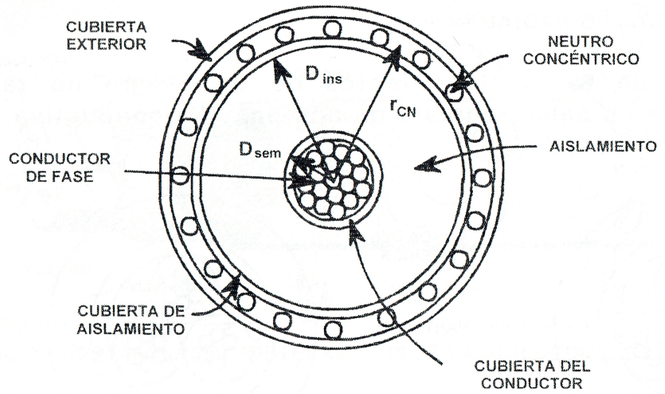
CABLES CON CAMPO RADIAL

Con el fin de anular los efectos de un campo no radial, cada conductor de un cable requiere de una pantalla conductiva.



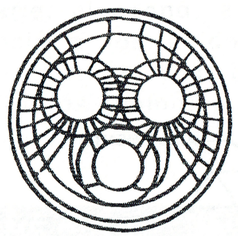


VISTA DE UN CABLE

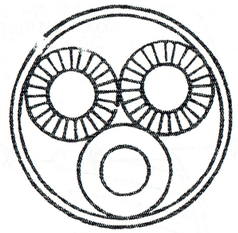


SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN CABLE

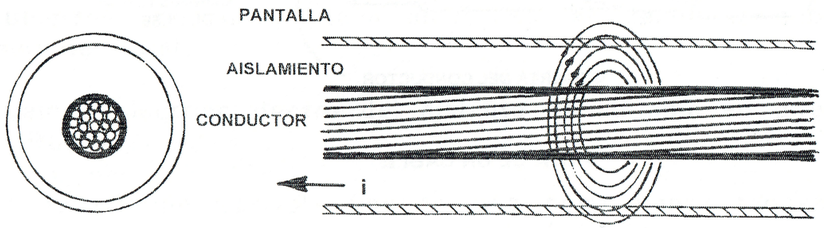
CABLES DE DISTRIBUCIÓN SUBTERRÁNEA



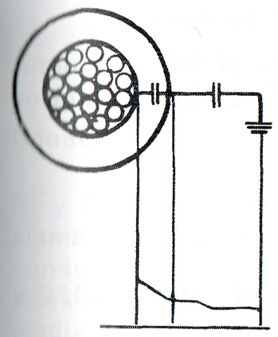
CABLE SIN PANTALLA



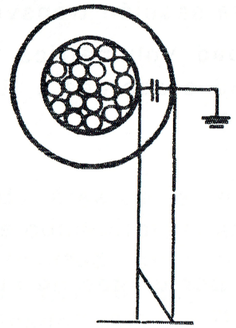
CABLE CON PANTALLA



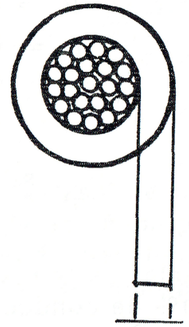
TENSIÓN INDUCIDA EN LA PANTALLA METÁLICA DE UN CABLE PARA MEDIA TENSIÓN



CABLE SIN PANTALLA



CABLE CON PANTALLA



CABLE CON PANTALLA NO ATERRIZADA

4.6 LA RESISTENCIA DEL CONDUCTOR

Los parámetros de los cables son de utilidad para el diseño de las redes de distribución, ya que con ellos se puede hacer la evaluación técnica para la selección correcta del calibre del conductor, en base a la caída de tensión y las pérdidas principalmente, y a partir de esto, también hacer el estudio mecánico.

Estos parámetros permiten obtener el valor de la impedancia del cable (Z) que requiere para los estudios de cortocircuito y otros análisis de estado estable y transitorio.

4.6.1 RESISTENCIA A LA CORRIENTE DIRECTA

Como se ha estudiado antes, la resistencia de un conductor a la corriente directa, que está formado por un alambre de cualquier material, está expresada por la fórmula:

$$R_{CD} = \rho \frac{L}{A} \ ohms$$

Donde:

L = Longitud del conductor

A = Área de la sección transversal del conductor.

ρ = Resistividad volumétrica del material del conductor en unidades acordes a L y A. Si L está en metros y A en mm^2

$$\rho = \frac{P mm^2}{m}$$

El valor de la resistividad por unidad de masa para el cobre a 20°C y 100% de conductividad es:

$$\beta = 0.15328\ ohm - gramo/m^2$$

Otros valores de resistividad del cobre son:

$$1.7241\ Microhm - cm$$

$$17.241\ \frac{ohm - mm^2}{Km}$$

Para el aluminio con 61% de conductividad y a 20°C, los valores de resistividad son:

$$2.828\ Microhm - cm$$

$$28.28\ \frac{ohm - mm^2}{Km}$$

4.6.2 EFECTO DEL CABLEADO

Los conductores de sección grande son difíciles de manipular cuando son sólidos, por lo tanto, es conveniente que se fabriquen en forma cableado, y entonces su resistencia es igual a la resistencia de cada uno de los conductores o alambres dividida entre el número de ellos.

$$R_{CD} = \frac{R^1}{n} = \frac{\rho}{n} x \frac{L}{A^1}$$

Donde:

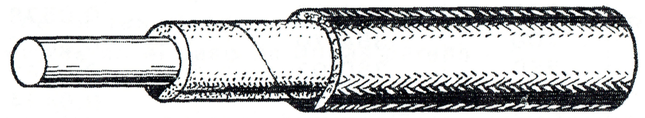
R^1 y A^1 son la resistencia del área de la sección transversal de cada alambre que forma el haz de conductores, esta fórmula es válida para conductores de la misma longitud, pero en el cableado hay ligeras variaciones en la longitud, por lo que este efecto se incorpora mediante un "factor de cableado" (KC).

$$R_{CD} = \rho \frac{L}{A}(1 + K_C)$$

TABLA 4.6

INCREMENTO DE LA RESISTENCIA POR EFECTO DE CABLEADO

TIPO DE CABLEADO	Kc
Redondo Normal	0.020
Redondo compacto	0.020
Sectorial	0.015
Segmental	0.020



CONDUCTOR SÓLIDO CON DOS CAPAS DE AISLAMIENTO

CONDUCTOR CABLEADO

TABLA 4.7

RESISTENCIA A LA CORRIENTE DIRECTA A 20°C
EN CONDUCTORES DE COBRE CON CABLEADO
CONCÉNTRICO NORMAL, COMPRIMIDO Y COMPACTO

mm^2	AWG MCM	ÁREA DE LA SECCIÓN (mm^2)	RESISTENCIA ELÉCTRICA NOMINAL A LA CD (20°C) (CU SUAVE) Ω/KM
	8	8.37	2.10
	6	13.30	1.322
	5	16.77	1.050
	4	21.15	0.832
	3	26.70	0.660
	2	33.60	0.523
35		34.89	0.504
	1	42.41	0.415
50		48.30	0.364
	1/0	53.50	0.329
	2/0	67.43	0.261
70		69.00	0.255
	3/0	85.00	0.207
	4/0	107.21	0.164
	250	126.70	0.139
150	300	152.01	0.116
	350	177.34	0.0992
	400	202.70	0.0867
240		242.50	0.0726
	500	253.4	0.0694
	600	304.02	0.0578
	700	354.70	0.0496
	750	380.02	0.0463
	800	405.36	0.0434
	1000	506.7	0.0347

TABLA 4.8

RESISTENCIA A LA CORRIENTE DIRECTA A 20°C
EN CONDUCTORES DE ALUMINIO CON CABLEADO
CONCÉNTRICO NORMAL, COMPRIMIDO Y COMPACTO

DESIGNACIÓN AWG MCM	ÁREA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL (mm^2)	RESISTENCIA ELÉCTRICA NOMINAL A LA CD OHM/KM A 20°C
2	33.6	0.860
1/0	53.5	0.539
2/0	67.4	0.428
3/0	85.0	0.3391
4/0	107.2	0.269
250	126.7	0.228
350	177.3	0.163
500	253.4	0.114
600	304.0	0.0948
700	354.7	0.0813
1000	506.7	0.0569

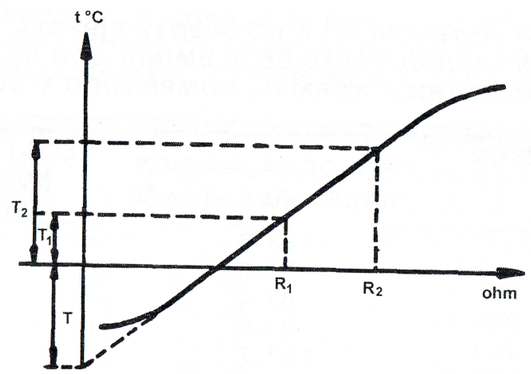
4.7 EL EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA RESISTENCIA

Los únicos cambios que se dan en los conductores eléctricos dentro de los límites normales de operación, son los incrementos en la resistencia y en la longitud que sufren por los cambios de temperatura, el más importante para los cables aislados es el cambio en el valor de la resistencia, **ya que el incremento en la longitud sólo es de interés en el caso de líneas aéreas.**

La resistencia (R_2) a una temperatura (T_2), cualquiera en función de la resistencia (R_1) a una temperatura (T_1) distinta de cero, está dada por la ecuación:

$$R_2 = R_1[1+ \propto (T_2 - T_1)]$$

$$R_2 = R_1[\,1 + \alpha\,(T_2 - T_1)\,]$$



VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA DE UN CONDUCTOR ELÉCTRICO METÁLICO CON LA TEMPERATURA

α = Coeficiente de corrección por temperatura.

Los valores de la temperatura T en °C para los materiales que se usan comúnmente en la fabricación de conductores eléctricos, son los siguientes:

T = 234.5°C para cobre recocido estirado en frío con 100% de conductividad

T = 241°C para cobre semidenso estirado en frío con 97.3% de conductividad.

T = 228°C para aluminio estirado en frío con 61% de conductividad.

De la figura anterior, tomando la parte lineal, se deduce que:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T_2 + T}{T_1 + T}$$

Los factores de corrección para el cobre, se obtienen de la ecuación:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{234.5 + 20}{234.5 + T} = \frac{254.5}{234.5 + T}$$

Para el aluminio con 61% de conductividad: $\frac{R_1}{R_2} = \frac{228 + 25}{228 + T} = \frac{253}{228 + T}$

R1 = Resistencia a 20°C.

R2 = Resistencia a la temperatura T2.

T = Temperatura de prueba.

TABLA 4.9

FACTORES DE CORRECCIÓN POR TEMPERATURA PARA CÁLCULO DE RESISTENCIAS DE CONDUCTORES ELÉCTRICOS DE COBRE Y ALUMINIO

TEMPERATURA DEL CONDUCTOR EN °C	FACTOR DE CORRECCIÓN A 20°C	
	COBRE	ALUMINIO
0	1.085	1.088
5	1.062	1.064
10	1.040	1.042
15	1.020	1.020
20	1.000	1.000
25	0.980	0.980
30	0.962	0.961
35	0.944	0.943
40	0.927	0.925
45	0.910	0.908
50	0.894	0.892
55	0.879	0.876
60	0.869	0.861
65	0.850	0.846
70	0.836	0.832
75	0.822	0.818
80	0.809	0.805
85	0.796	0.792
90	0.784	0.780

4.8 RESISTENCIA A LA CORRIENTE DIRECTA

Normalmente la resistencia de un conductor por el que circula corriente alterna es mayor que la resistencia que presenta el mismo conductor a la corriente directa, este incremento se debe a dos efectos:

- El llamado efecto superficial o de piel.
- El efecto de proximidad.

El valor de esta resistencia se calcula de acuerdo con la ecuación:

$$R_{CA} = R_{CD}(1 + Y_S + Y_P)$$

Donde:

RCA = Resistencia en corriente alterna.
RCD = Resistencia en corriente directa.
YS = Factor de corrección por efecto piel.
YP = Factor de corrección por efecto de proximidad.

TABLA 4.10

Factores KS y KP	KS	KP
Conductor redondo compacto	1.0	1.0
Conductor redondo	1.0	1.0
Conductor compacto segmental	0.435	0.37

La resistencia de los conductores para cables, se puede calcular también por medio del uso de curvas desarrolladas por los fabricantes para cada tipo de cable.

Ejemplo

Calcular la resistencia efectiva de un cable monopolar con conductor compacto de cobre suave, calibre 500 KCM, bajo las condiciones de instalación que se indican:

1) Temperatura de operación del conductor 90°C.
2) Frecuencia del sistema donde opera, 60 HZ.
3) Distancia entre centros de conductores.

Solución

1) La resistencia en C.D., se calcula como: $R_{CD} = \beta \frac{L}{A}$

Con: $\beta = 17.241\, ohm - mm^2 / Km$

Para el conductor de 500 KCM, A = 253.4 mm^2

$$R_{CA} = \frac{17.241}{253.4} = 0.06804\,\Omega/Km$$

Aplicando el factor de corrección por cableado:

$K_C = 0.02$

$R_{CD\ 20°C} = 1.02 \times 0.06804 = 0.0694\ ohm/Km$

Corrección a la temperatura de operación:

El factor de corrección para conductor de cobre:

$$\propto = \frac{1}{234.5 + 20} = 0.003929/°C$$

$$R_{CD_{90°C}} = 0.0694[1 + 0.00393(90 - 20)] = 0.0885\ ohm/Km$$

Aplicando los factores de corrección por efecto piel y de proximidad para obtener el valor de resistencia en C.A., se tiene:

Por efecto piel:

$$Y_S{}^2 = \frac{8\pi}{0.0885}(60)x10^{-4}(1.0) = 1.704$$

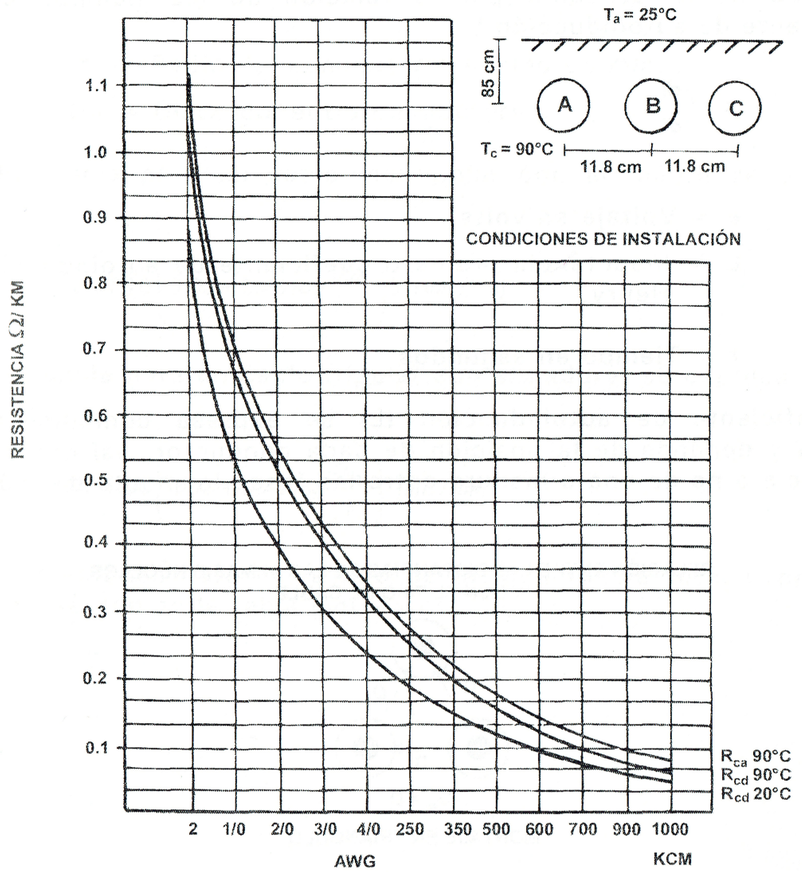
$$Y_S = \frac{1.704}{192 + 0.8(1.704)^2} = 8.768 \times 10^{-3}$$

Por efecto de proximidad:

$$Y_P{}^2 = \frac{8\pi}{0.0885}(60)x10^{-4}(1.0) = 1.704$$

Por lo tanto:

$$R_{CA_{(90°C)}} = 0.0885(1 + 0.015) = 0.0899\ ohm/Km$$



RESISTENCIA DE CABLES DE ENERGÍA VULCANEL EP - TIPO DS CONDUCTOR DE ALUMINIO 15 y 25 kV

4.9 COEFICIENTE DE AUTOINDUCCION

La fuerza electromotriz (T.C.M.) inducida es igual al producto de la variación de la corriente por la relación de los tiempos con el coeficiente de autoinducción L.

$$e = L\frac{di}{dt}$$

Donde:

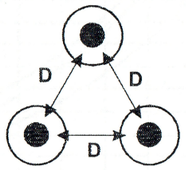
e = Voltaje en volts

L = Inductancia propia o coeficiente de autoinducción en Henry.

t = Tiempo en segundos

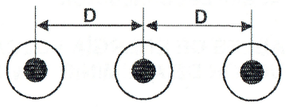
El coeficiente de autoinducción (L) se expresa comúnmente en mH/km y depende de la posición de cada conductor, así como de la presencia o no de una armadura entre las fases (aumento del 10%)

RELACIÓN ENTRE LAS DISTANCIAS DE LAS ALMAS O NÚCLEOS SEGÚN EL TIPO DE CABLE



$D_m = D$

MONTAJE EN TRIÁNGULO



$D_m = 1.26\ D$

MONTAJE EN UN PLANO HORIZONTAL

La inductancia para un cable no armado se expresa como:

$$L = 0.05 \times 0.46 \log \frac{D_M}{r} \ (en\ mH/Km)$$

r = Radio del conductor o núcleo en mm.

D_M = Distancia entre conductores.

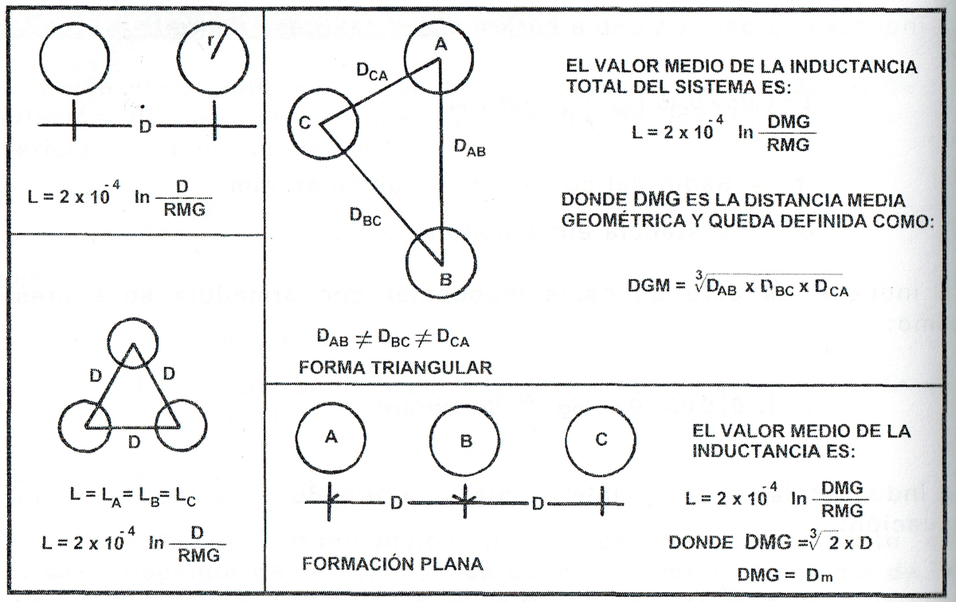
La inductancia para un cable monopolar con armadura se expresa como:

$$L = 1.10\left(0.05 + 0.46 \log \frac{D_M}{r}\right) (en\ mH/Km)$$

La inductancia para un cable tripolar con armadura, se expresa con la ecuación:

$$L = 1.30\left(0.05 + 0.46 \log \frac{D_M}{r}\right) \ (mH/Km)$$

Otras expresiones para el cálculo de la inductancia total expresada en H/Km, se dan en la tabla siguiente:



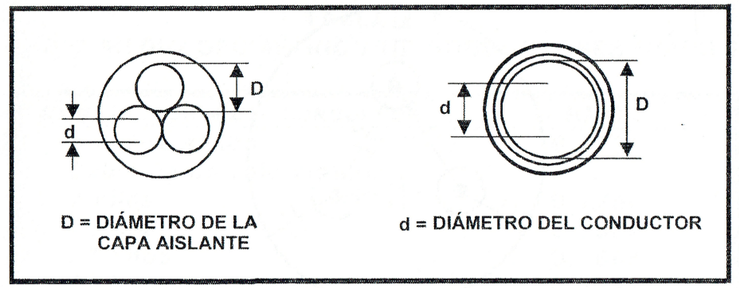
FÓRMULAS DE CÁLCULO DE LA INDUCTANCIA TOTAL (H/km)

4.10 CÁLCULO DE LA CAPACITANCIA DE UN CABLE

La capacitancia de un cable de alta tensión, a partir de los datos proporcionados por el fabricante, depende de las características dimensionales del mismo, así como de la constante dieléctrica E, cuyo valor depende del material aislante usado.

La capacitancia del cable está dado por la expresión:

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \ln \frac{D}{d}} \mu F/Km$$

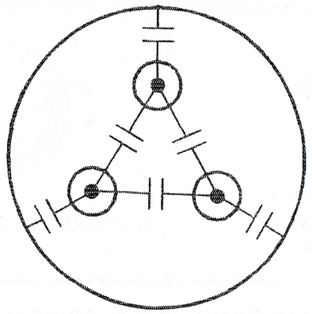


DISTANCIAS DIMENSIONALES DE CABLES

TABLA 4.11

CARACTERÍSTICAS

AISLANTES	RESISTIVIDAD TÉRMICA (K.M./W)	CONSTANTE DIELÉCTRICA	RIGIDEZ DIELÉCTRICA (KV/MM)	FACTOR DE ÁNGULO DE PÉRDIDAS
Cloruro de polivinilo (PVC)	6	4 a 8	30	---
Polietileno (PE)	3.5	2.3	40	0.001
Polietileno reticular (Pr)	3.5	2.3 - 5.8	35	---
Copolímero de Etileno propileno (EPDM)	3.5	3 a 3.5	30	---
Gama de Silicio (SIL)	3.5 a 4.5	3 a 5	30	---
Gama de Termoplástico (TPR)	4.5	2.7	30	0.001



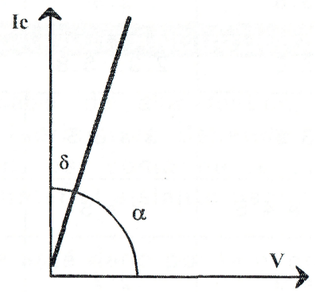
UN CABLE ESTÁ CONSTITUÍDO DE UN SISTEMA COMPLEJO DE CAPACITANCIAS "PARCIALES"

- ENTRE LOS DISTINTOS CONDUCTORES
- ENTRE CADA CONDUCTOR Y EL MEDIO EXTERIOR (CUBIERTA METÁLICA, ETC.)

PARA TENER UN VALOR PRECISO DE LA CAPACITANCIA APARENTE ES PREFERIBLE EFECTUAR UNA MEDICIÓN PARA UN CABLE DE LONGITUD L QUE OPERA CON UNA TENSIÓN SENOIDAL V Y POR EL QUE CIRCULA UNA CORRIENTE Ic DEL LADO DE ALIMENTACIÓN SU VALOR ES :

$$Ic = VCW \times 10^{-6}$$

C EN μF



LA tg SE LE LLAMA LA "TANGENTE DEL ÁNGULO DE PÉRDIDAS DIELÉCTRICAS"

LA POTENCIA DE LAS PÉRDIDAS (EN W / km) EN EL DIELÉCTRICO DE UN CONDUCTOR ES:

$$P = V^2 C\ \omega\ tg\ \delta \times 10^{-6}$$

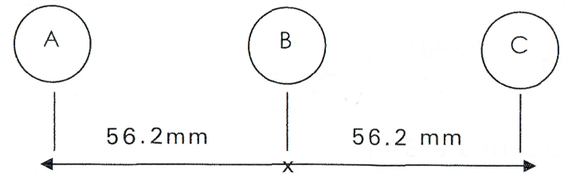
(C EN μF)

TABLA 4.12
RADIO MEDIO GEOMÉTRICO DE CONDUCTORES USUALES

CONSTRUCCIÓN DEL CONDUCTOR	RMG
Alambre sólido	0.779r
Cable de un sólo material:	
7 hilos	0.726r
19 hilos	0.758r
37 hilos	0.768r
61 hilos	0.772r
91 hilos	0.774r
127 hilos	0.776r
r = radio del conductor	

Ejemplo

Calcular la inductancia y reactancia inductiva a 60 Hz de un sistema trifásico de cables denominados VULCANEL XLP, 15KV, 250 KCM con conductor de cobre, 37 hilos con formación plana separados 56.2 mm.



Solución

La inductancia se calcula como:

$$L = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{DMG}{RMG}\ H/Km$$

Donde:

$$DMG = \sqrt[3]{2}\ x\ D$$

D = Separación entre centros de cables

Para el calibre 250 KCM con 37 hilos, se tienen los siguientes datos:

Diámetro del conductor = 13.7 mm

Diámetro total = 28.1 mm

$$DMG = \sqrt[3]{2}\ x\ 56.2 = 70.80mm$$

Para 37 hilos:

$$RMG = 0.768r$$

$$RMG = 0.768\ x\ \frac{13.7}{2} = 5.261mm$$

Por tanto:

$$L = 2\ x\ 10^{-4}\ ln\left(\frac{70.80}{5.261}\right) = 0.52\ \frac{mH}{Km}$$

La reactancia inductiva a 60 Hz:

$$XL = 2\pi\ fL = 2\pi\ x\ 60\ x\ 0.52\ x\ 10^{-3}$$

$$XL = 0.196\ ohm/Km$$

Tratándose de un cable no armado, la inductancia se puede calcular también con la expresión:

$$L = 0.05 + 0.46\ log\ \frac{DMG}{r}$$

$$L = 0.05 + 0.46\ log\left(\frac{70.80}{13.7/2}\right) = 0.5165\ \frac{mH}{Km}$$

Si se tratara de un cable monopolar con armadura, la inductancia sería:

$$L = 1.10\left(0.05 + 0.46\ log\ \frac{DMG}{r}\right)$$

$$L = 1.10\ x\ (0.5165) = 0.5682\ mH/Km$$

Ejemplo

Calcular la capacitancia y reactancia capacitiva de un cable tipo Vulcanel EP, 15KV, calibre 500 KCM, cuyas características son las siguientes:

Diámetro total (sobre el aislamiento) = 29.43 mm

Diámetro bajo el aislamiento = 20.19 mm

Frecuencia de operación = 60 Hz

Solución

La ecuación para el cálculo de la capacitancia es:

$$C = \frac{\varepsilon}{18\ ln\ \frac{D}{d}}\ \mu F/Km$$

Como: ln = 2.303 log, la ecuación anterior se puede escribir también como:

$$C = \frac{0.0241\varepsilon}{log\ \frac{D}{d}}$$

Para este ejemplo:

$$D = 29.43mm$$

$$d = 20.19mm$$

Para el Vulcanel se puede tomar: $\mathcal{E} = 2.3$

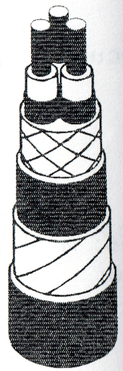
$$C = \frac{2.3}{18\,\ell n\left(\frac{29.43}{20.19}\right)} = 0.3390\ \mu F/Km$$

La reactancia capacitiva a 60 Hz:

$$Xc = \frac{1}{2\pi f c} = \frac{1}{2\pi x\ \ 60 \times 0.339 \times 10^{-6}}$$

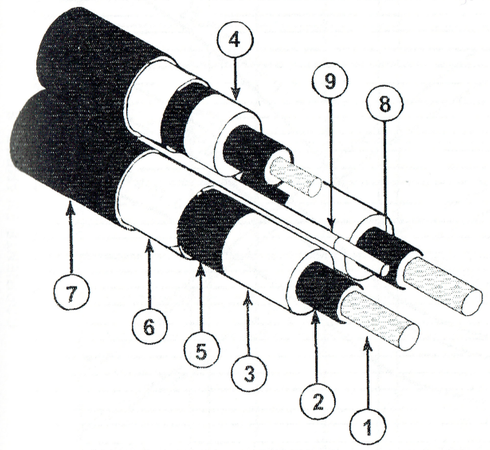
$$Xc = 0.0078247\ \ M\Omega - Km$$

EJEMPLOS DE CABLES

CABLE UNIPOLAR		CABLE TRIPOLAR	
ALMA DEL CONDUCTOR ALUMINIO Ó COBRE		ALMA DEL CONDUCTOR ALUMINIO Ó COBRE	
PANTALLA SEMICONDUCTORA SOBRE EL ALMA EXTRUÍDA		PANTALLA SEMICONDUCTORA SOBRE EL ALMA EXTRUÍDA	
CUBIERTA AISLANTE POLIETILENO		CUBIERTA AISLANTE POLIETILENO	
PANTALLA SEMICONDUCTORA SOBRE LA CUBIERTA AISLANTE - EXTRUÍDA		PANTALLA SEMICONDUCTORA SOBRE LA CUBIERTA AISLANTE - EXTRUÍDA	
PANTALLA METÁLICA CINTA DE COBRE FUNDA EXTERIOR PVC Ó PE		PANTALLA METÁLICA CINTA DE COBRE (Ó HILOS)	
		FUNDA DE SEPARACIÓN FUNDA EXTRUIDA O METAL SOBRE ARMADURA	
		ARMADURAS -CAPAS	
		FUNDA EXTERIOR PVC ó PE	

GRUPO DE CONDUCTORES AUTOSOPORTADOS

EN LOS CASOS EN QUE LA INSTALACIÓN DE LOS CABLES NO SE PUEDA HACER EN FORMA SUBTERRÁNEA, EL USO DE CABLES AISLADOS FORMANDO GRUPOS O HACES DE CONDUCTORES ES UNA SOLUCIÓN.

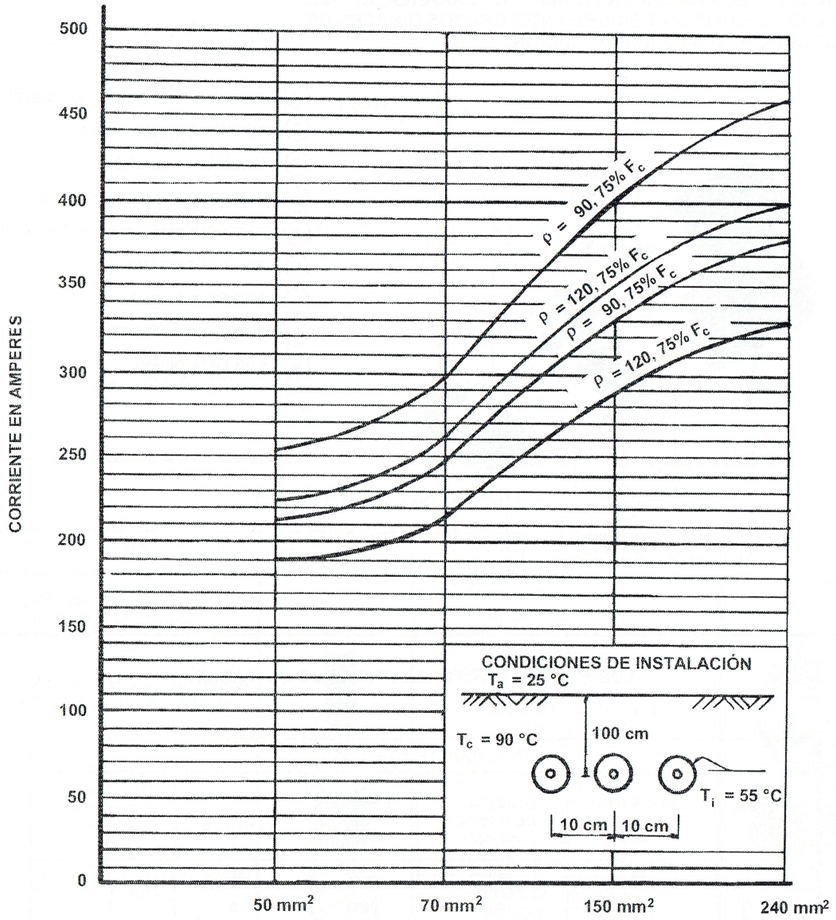


1.- ALMA RÍGIDA (COBRE O ALUMINIO)
2.- CUBIERTA CONDUCTORA
3.- CUBIERTA AISLANTE
4.- RECUBRIMIENTO CONDUCTOR
5.- CINTA CONDUCTORA
6.- CINTA COBRIZADA
7.- CUBIERTA EN PVC
8.- PORTADOR EN ACERO
9.- CUBIERTA DE PVC

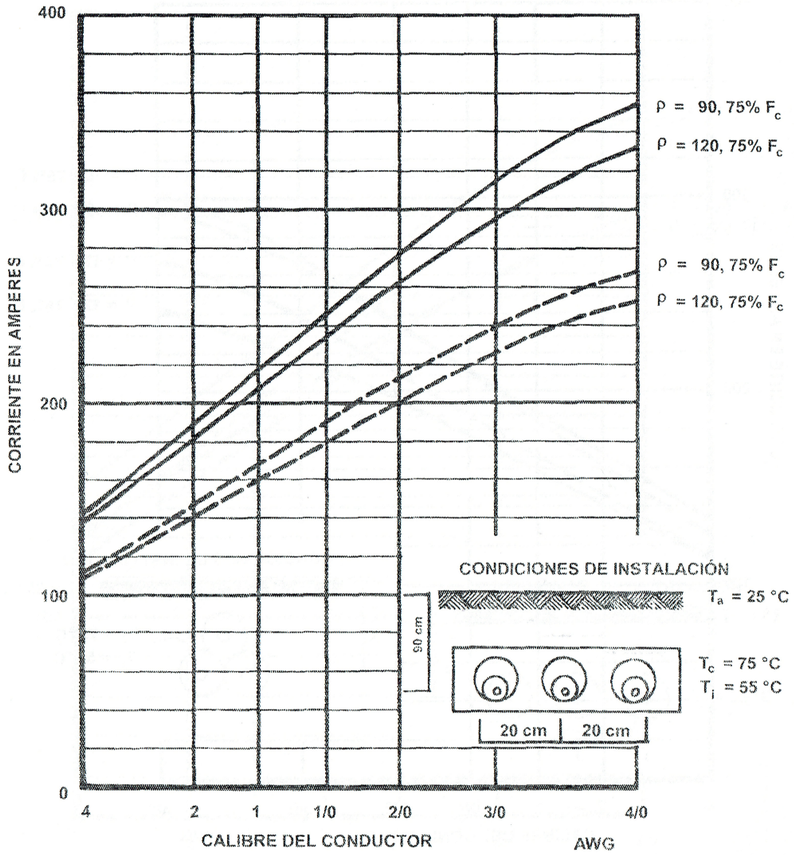
EJEMPLO DE CARACTERÍSTICAS DE UN CABLE

CARACTERÍSTICA DE LOS HACES					
SECCIÓN (mm^2)	DIÁMETRO DE UN CABLE (mm)	DIÁMETRO DE UN HAZ (mm)	PESO DE UN HAZ (mm)	CORRIENTE MÁXIMA ADMISIBLE (A)	CAÍDA MÁXIMA POR AMPERE POR kM (V)
35	24	59	2300	160	1.7
50	26	63	2600	190	1.3
70	27	65	2900	235	0.92
95	29	69	3250	290	0.69
120	30.5	72	3650	330	0.56
150	32	75	4000	375	0.48

CORRIENTE EN CABLES DE ENERGÍA VULCANET 23 TC INSTALADOS DIRECTAMENTE ENTERRADOS Y PANTALLAS A TIERRA



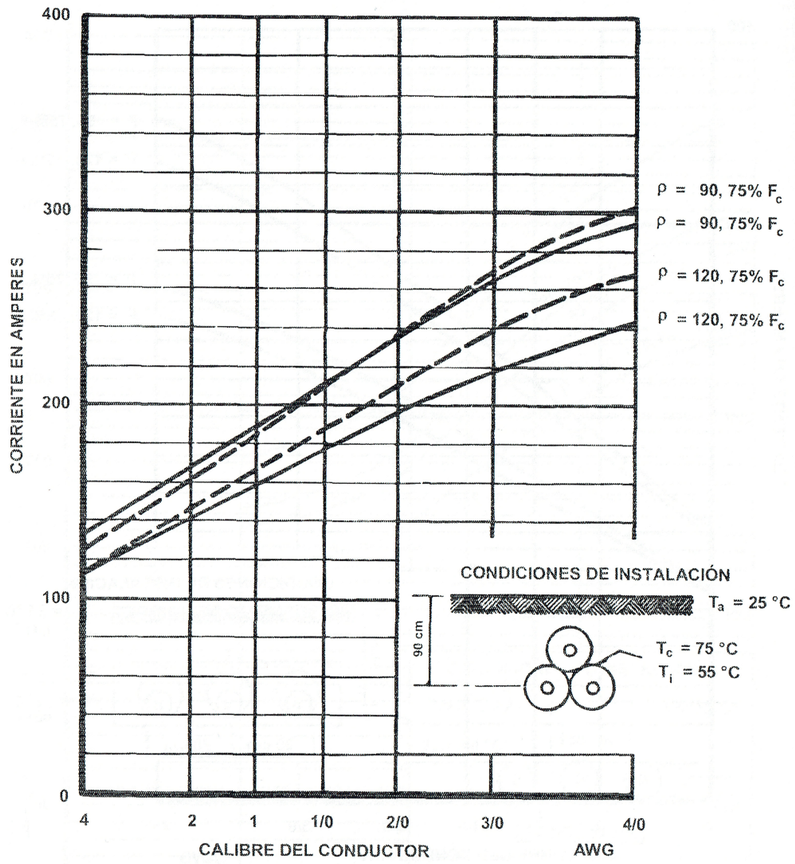
CORRIENTE EN CABLES DE ENERGÍA SINTENAX 15 Y 25 kV EN DUCTOS SUBTERRÁNEOS Y PANTALLAS A TIERRA



TEMPERATURA EN EL CONDUCTOR 75°C

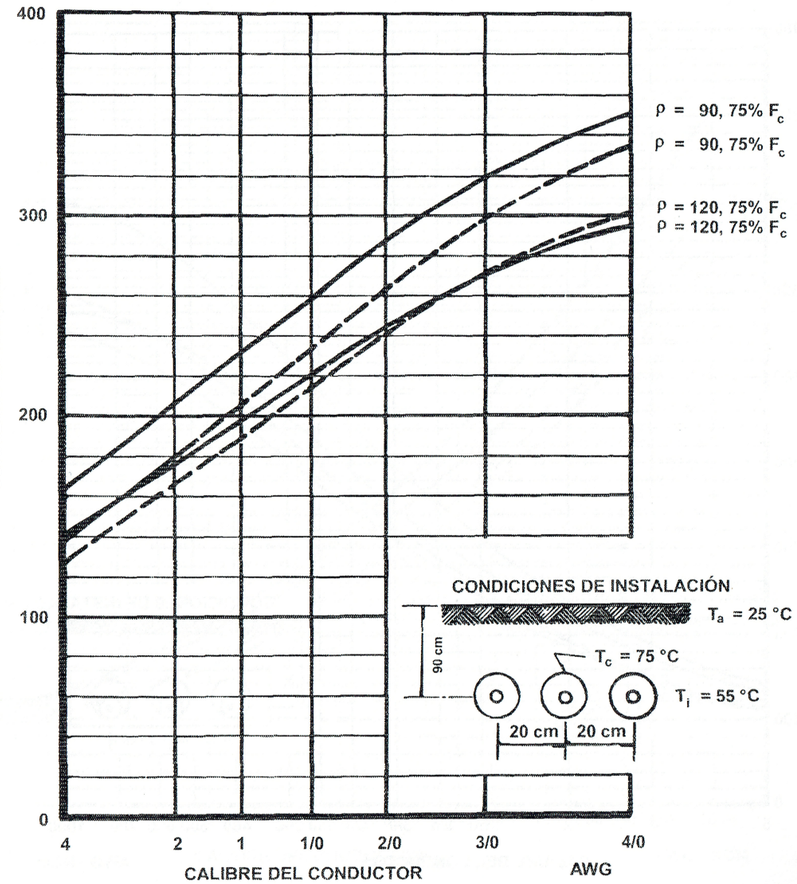
TEMPERATURA DE INTERFASE 55°C

CORRIENTE EN CABLES DE ENERGÍA SINTENAX 15 Y 25 kV DIRECTAMENTE ENTERRADOS Y PANTALLAS A TIERRA



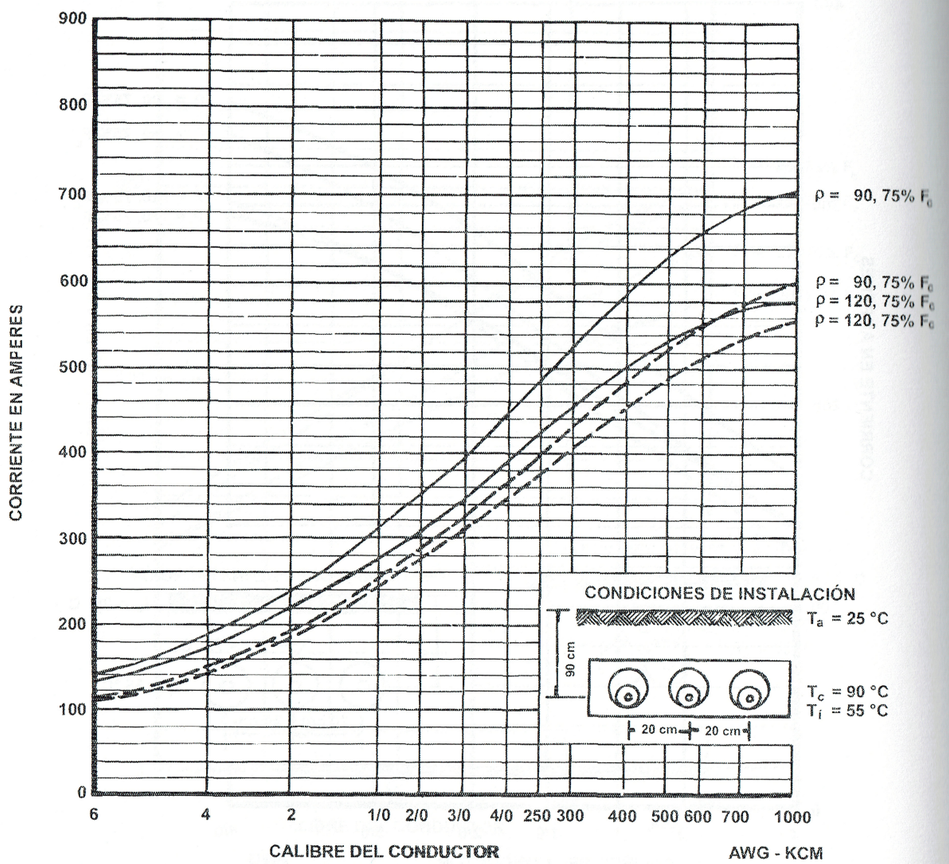
TEMPERATURA EN EL CONDUCTOR 75°C
TEMPERATURA DE INTERFASE 55°C

CORRIENTE EN CABLES DE ENERGÍA SINTENAX 15 Y 25 kV DIRECTAMENTE ENTERRADOS Y PANTALLAS A TIERRA



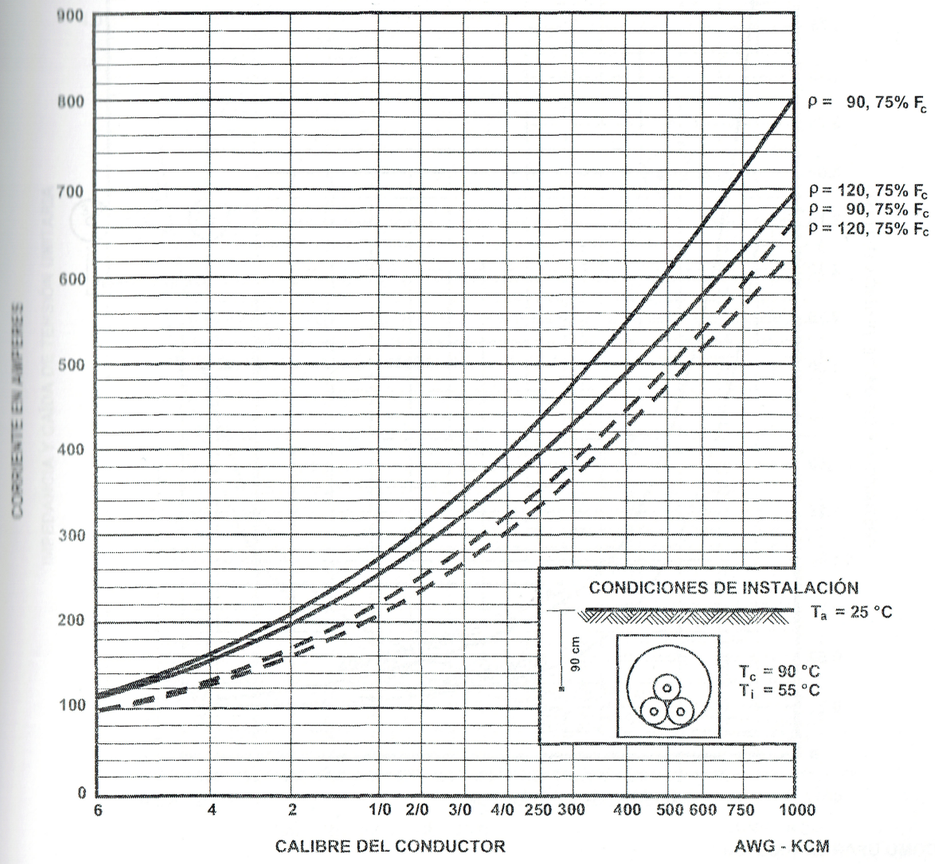
TEMPERATURA EN EL CONDUCTOR 75°C
TEMPERATURA DE INTERFASE 55°C

CORRIENTE EN CABLES DE ENERGÍA VULCANEL EP Y XLP, 5, 15, 25, 35 kV EN DUCTOS SUBTERRÁNEOS Y PANTALLAS A TIERRA



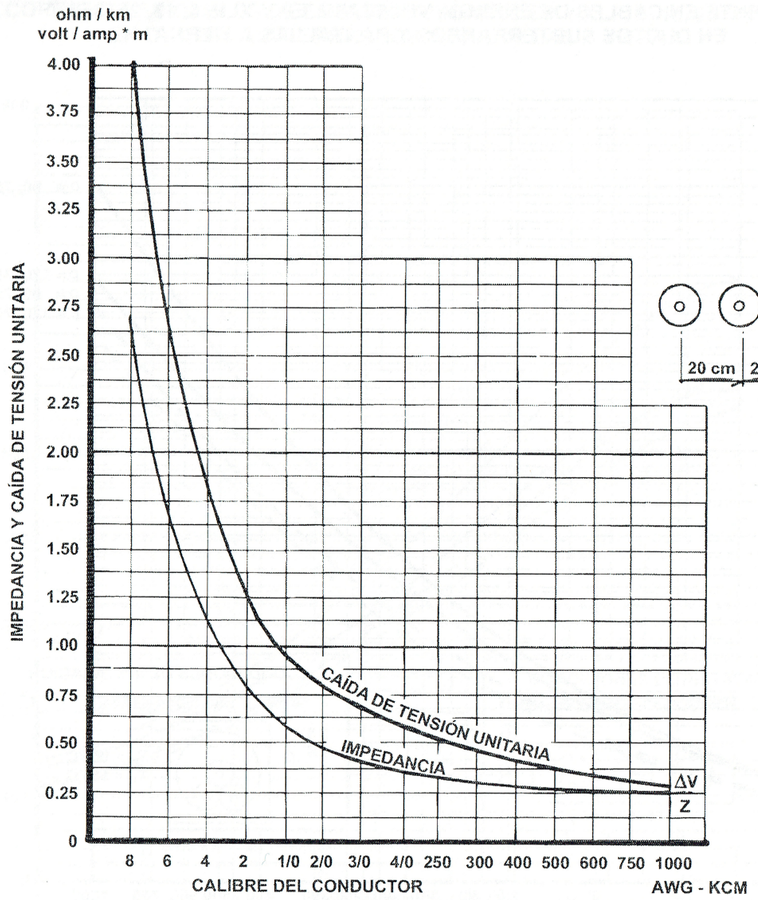
TEMPERATURA EN EL CONDUCTOR 90°C
TEMPERATURA DE INTERFASE 55°C

CORRIENTE EN CABLES DE ENERGÍA VULCANEL EP Y XLP, 5, 15, 25, 35 kV EN DUCTOS SUBTERRÁNEOS Y PANTALLAS A TIERRA



TEMPERATURA EN EL CONDUCTOR 90°C
TEMPERATURA DE INTERFASE 55°C

IMPEDANCIA Y CAÍDA DE TENSIÓN EN CABLES VULCANEL EP Y XLP, 5, 15, 25 Y 35 kV CON PANTALLAS A TIERRA, INSTALADOS EN DUCTOS SUBTERRÁNEOS O DIRECTAMENTE ENTERRADOS



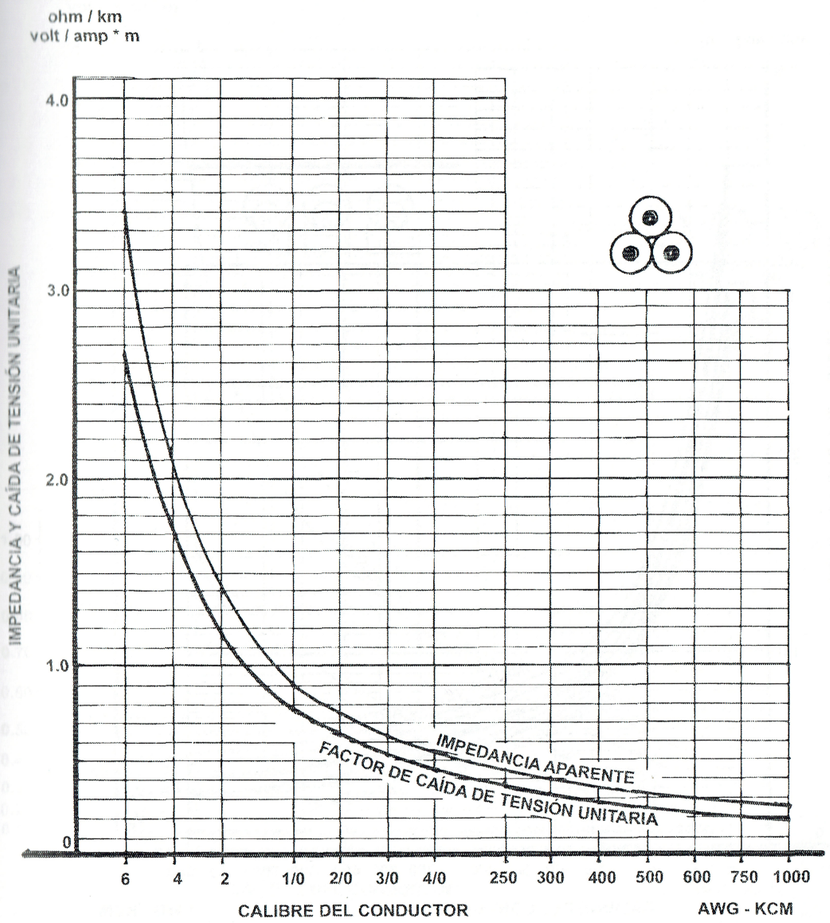
COMO USAR LA GRÁFICA :

PARA OBTENER LA CAÍDA DE TENSIÓN EN VOLTS, MULTIPLIQUE EL VALOR TOMADO DE LA GRÁFICA POR LA LONGITUD DE LA LÍNEA EN Km Y LA CORRIENTE POR CONDUCTOR EN AMPERES.

CONDICIONES SUPUESTAS :

SISTEMA TRIFÁSICO, FACTOR DE POTENCIA 85%, FRECUENCIA 60 Hz, TEMPERATURA EN EL CONDUCTOR 90°C

IMPEDANCIA Y CAÍDA DE TENSIÓN UNITARIA DEL CABLE VULCANEL EP Y XLP, 5 Y 15 kV CON PLOMOS A TIERRA, INSTALADOS EN CHAROLAS, DUCTOS SUBTERRÁNEOS O DIRECTAMENTE ENTERRADOS



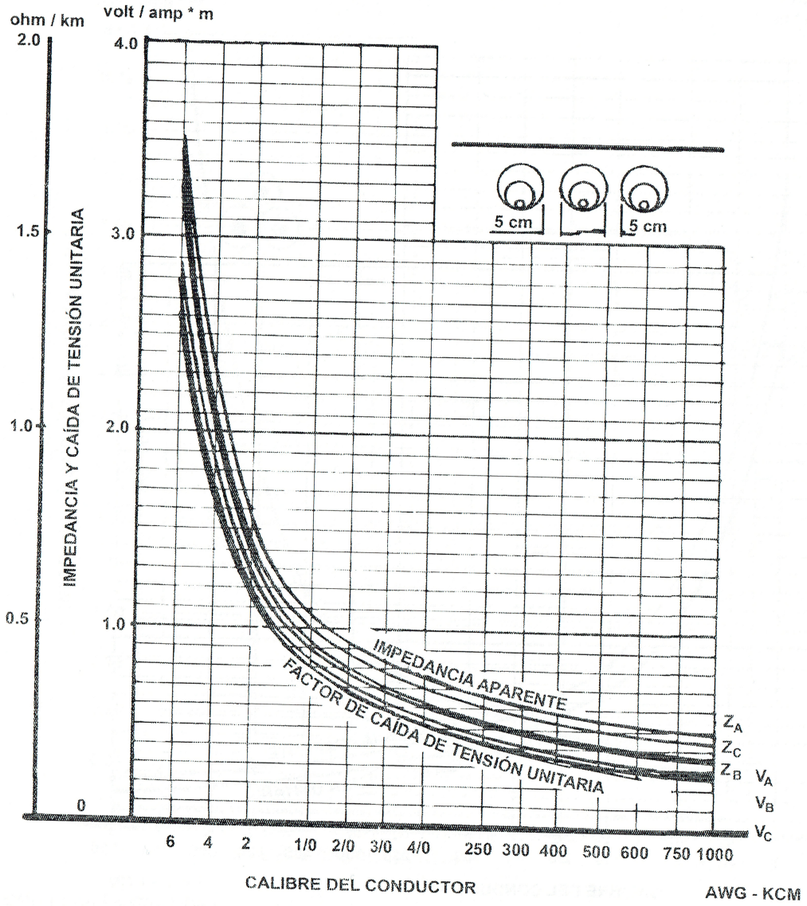
COMO USAR LA GRÁFICA :

PARA OBTENER LA CAÍDA DE TENSIÓN EN VOLTS, MULTIPLIQUE EL VALOR TOMADO DE LA GRÁFICA POR LA LONGITUD DE LA LÍNEA EN Km Y LA CORRIENTE POR CONDUCTOR EN AMPERES.

CONDICIONES SUPUESTAS :

SISTEMA TRIFÁSICO, FACTOR DE POTENCIA 85%, FRECUENCIA 60 Hz, TEMPERATURA EN EL CONDUCTOR 90°C

IMPEDANCIA Y CAÍDA DE TENSIÓN UNITARIA DEL CABLE VULCANEL EP Y XLP, 5 Y 15 kV CON PLOMOS A TIERRA, INSTALADOS EN DUCTOS SUBTERRÁNEOS O DIRECTAMENTE ENTERRADOS



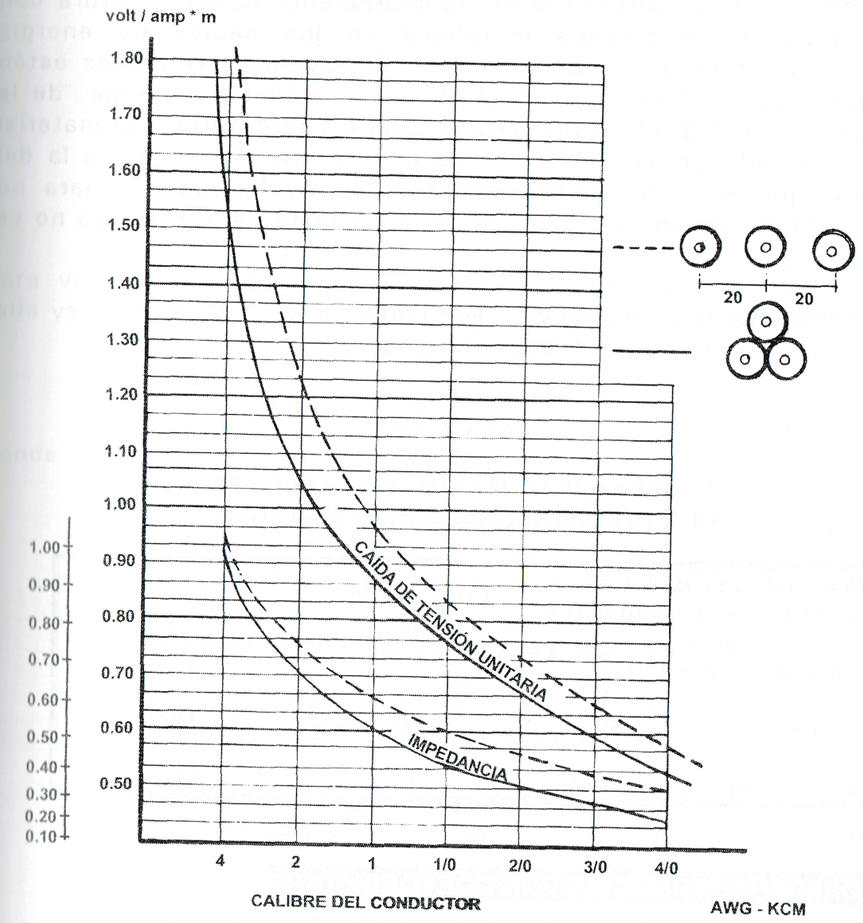
COMO USAR LA GRÁFICA :

PARA OBTENER LA CAÍDA DE TENSIÓN EN VOLTS, MULTIPLIQUE EL VALOR TOMADO DE LA GRÁFICA POR LA LONGITUD DE LA LÍNEA EN Km Y LA CORRIENTE POR CONDUCTOR EN AMPERES.

CONDICIONES SUPUESTAS :

SISTEMA TRIFÁSICO, FACTOR DE POTENCIA 85%, FRECUENCIA 60 Hz, TEMPERATURA EN EL CONDUCTOR 90°C

IMPEDANCIA Y CAÍDA DE TENSIÓN UNITARIA DEL CABLE SINTENAX EN DUCTOS Y DIRECTAMENTE ENTERRADOS, 15 y 25 kV



COMO USAR LA GRÁFICA :

PARA OBTENER LA CAÍDA DE TENSIÓN EN VOLTS, MULTIPLIQUE EL VALOR TOMADO DE LA GRÁFICA POR LA LONGITUD DE LA LÍNEA EN Km Y LA CORRIENTE POR CONDUCTOR EN AMPERES.

CONDICIONES SUPUESTAS :

SISTEMA TRIFÁSICO, FACTOR DE POTENCIA 85%, FRECUENCIA 60 Hz, TEMPERATURA EN EL CONDUCTOR 75°C

4.11 CONDICIONES DE CORTOCIRCUITO

Bajo condiciones de cortocircuito, se incrementa la temperatura con rapidez para los elementos metálicos en los cables de energía (conductor y pantalla o cubierta metálica). Cuando los cables están diseñados para soportar este incremento, este límite depende de la temperatura máxima admisible para la cual no se deteriore el material de las capas adyacentes, es decir, la que resulte menor entre la del conductor que no dañe al aislamiento o la de la pantalla para no deteriorar el aislamiento, o bien, la de la cubierta para que ésta no se dañe.

Las temperaturas máximas admisibles en condiciones de cortocircuito, se dan en la tabla siguiente:

TABLA 4.13

TEMPERATURAS MÁXIMAS ADMISIBLES EN CONDICIONES DE CORTO CIRCUITO

MATERIAL DEL CABLE EN CONTACTO CON EL CONDUCTOR O METAL	CONDUCTOR °C	PANTALLA °C
Termofijos (XLP o EP)	250	350
Termoplástico (PVC o PE)	150	200
Papel impregnado en aceite	200	200

4.12 CORRIENTE PERMISIBLE POR CORTOCIRCUITO

Para determinar la corriente permisible en el conductor o pantalla, es necesario conocer el tiempo en liberar la falla (interrumpir la falla, desde el momento en que se presenta, hasta que opera la protección), de acuerdo con el tipo de falla se deben verificar los distintos componentes de la siguiente manera:

a) Para el conductor:

- Cortocircuito trifásico balanceado.

b) Para la pantalla:

- Cortocircuito de fase a tierra.
- Cortocircuito trifásico desbalanceado (cálculo de la corriente de secuencia cero).

Para verificar la sección del conductor, conocidos los amperes de falla y la duración de la misma, se usa la siguiente ecuación:

$$\left[\frac{I}{A}\right]^2 t = K \log \frac{T_2 + T}{T_1 + T}$$

Donde:

I = Corriente máxima de cortocircuito permitida (Amperes).

K = Constante que depende del material del conductor.

A = Área de la sección transversal del conductor en circular mils.

t = Tiempo de duración del cortocircuito (segundos).

T = Temperatura en °C (bajo cero), a la cual el material de que se trate tiene resistencia eléctrica teóricamente nula.

T_1 = Temperatura inicial del conductor °C.

T_2 = Temperatura final del conductor °C.

TABLA 4.14

VALORES DE K Y T USADOS EN LA ECUACIÓN ANTERIOR

MATERIAL	K	T
Cobre	0.02997	234.5
Aluminio	0.01286	228.0
Plomo	0.00108	236.0
Acero	0.00355	180.0

TABLA 4.15

SELECCION DEL CABLE EN FUNCION DE LAS CORRIENTES DE FALLA

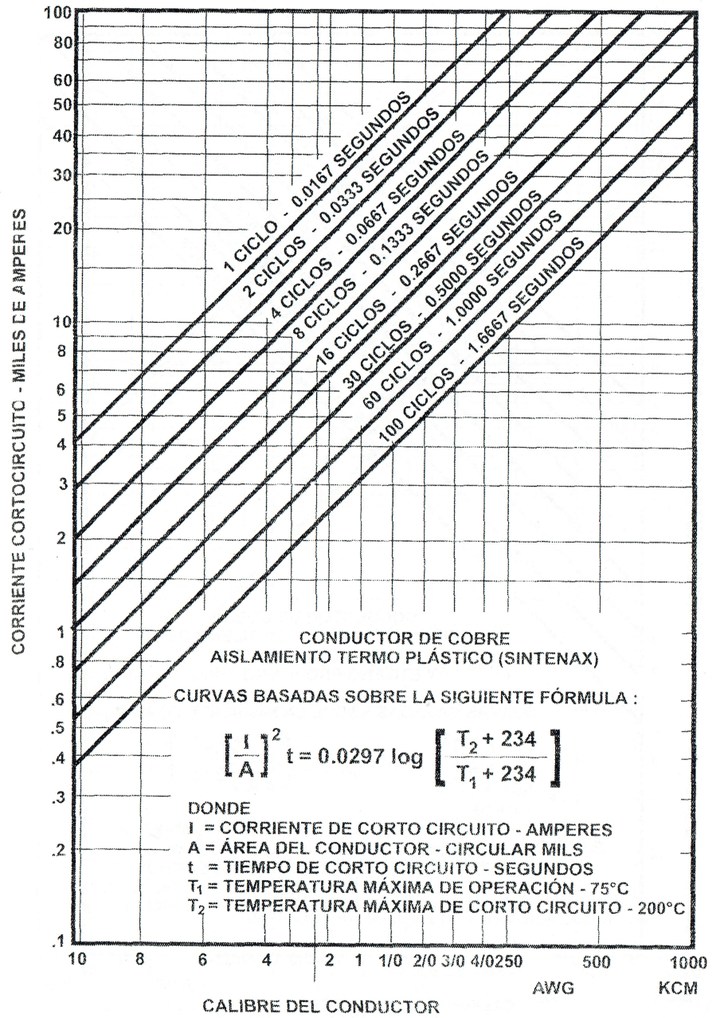
DENSIDADES MÁXIMAS ADMISIBLES DURANTE LAS FALLAS (A/mm^2)								
TIPO DE AISLAMIENTO	TEMPERATURA DEL CONDUCTOR °C		CONDUCTOR DE COBRE			CONDUCTOR DE ALUMINIO		
	INICIAL	FINAL	TIEMPO DE FALLA (s)			TIEMPO DE FALLA (s)		
			0.5	1	2	0.5	1	2
Polietileno	20	150	199	141	99	131	93	66
	30	150	189	134	95	125	88	63
	70	150	150	150	106	75	99	49
Policloruro de vinil (PVC)	20	160	205	145	102	135	96	68
	30	160	195	138	98	127	90	64
	70	160	158	111	79	104	73	52
Gama de etileno Propileno y polietileno Reticulado	20	250	249	176	124	164	116	82
	30	250	241	170	120	159	112	79
	90	250	196	139	98	129	91	65

La intensidad máxima de cortocircuito, se puede calcular también con la ecuación:

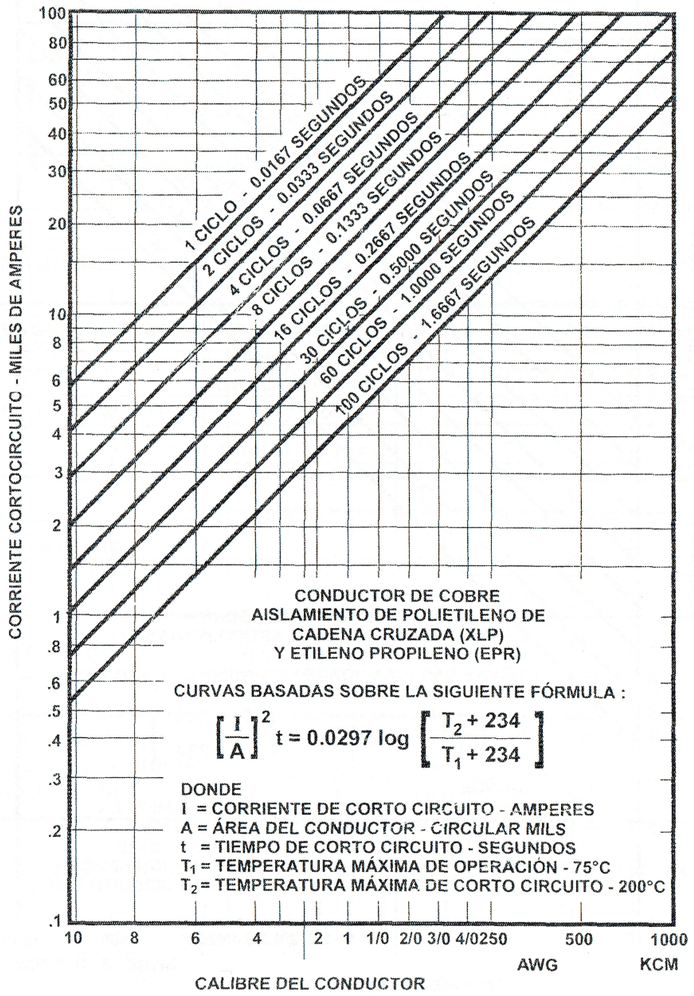
$$Icc = \delta \times S$$

δ = Densidad máxima admisible por el cable sin aislamiento ($Amperes/mm^2$).

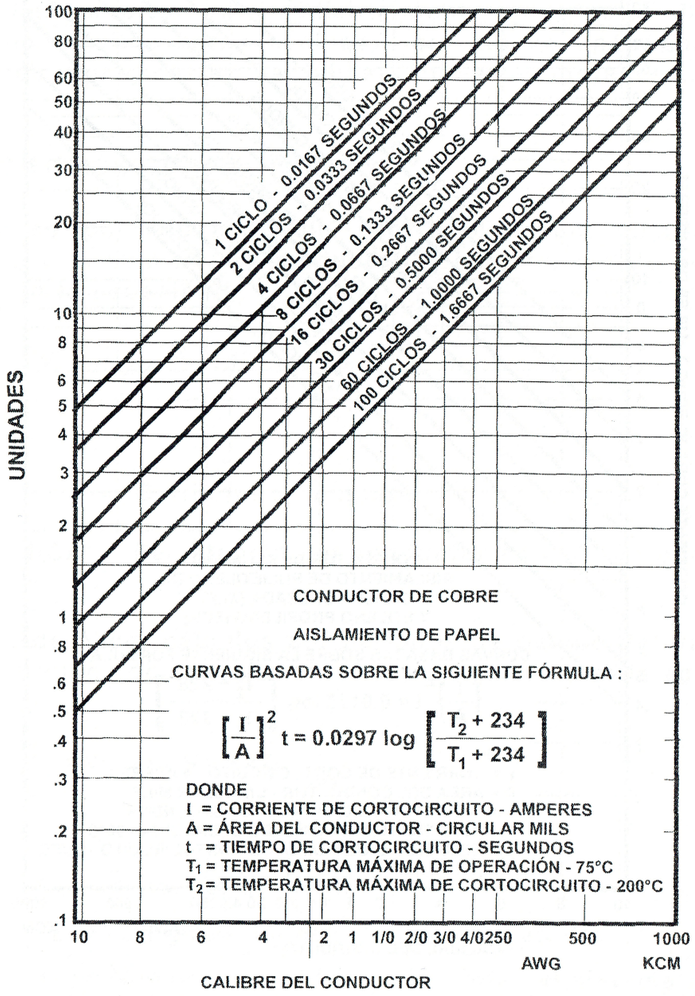
S = Sección del cable en mm^2



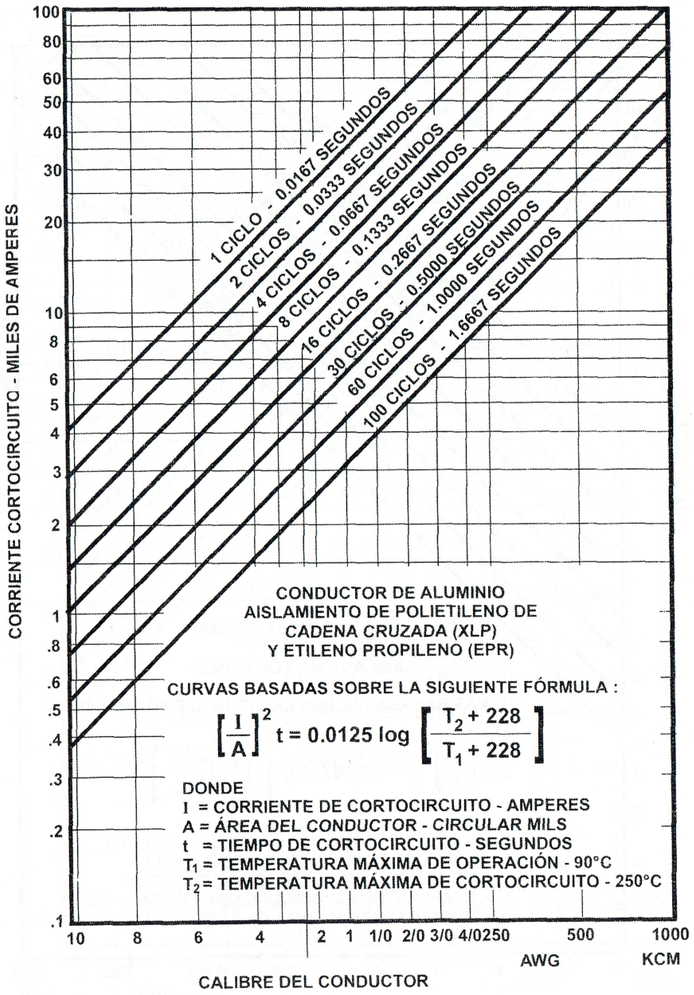
CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO PERMISIBLES PARA CABLES AISLADOS CON CONDUCTORES DE COBRE



CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO PERMISIBLES PARA CABLES AISLADOS CON CONDUCTORES DE COBRE



CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO PERMISIBLES PARA CABLES AISLADOS CON CONDUCTORES DE COBRE



CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO PERMISIBLES PARA CABLES AISLADOS CON CONDUCTORES DE ALUMINIO

4.13 PÉRDIDAS DE ENERGÍA

En los cables aislados como en los conductores aéreos, se presentan también las pérdidas por calentamiento o efecto **Joule**, pero adicionalmente en estos cables, se tienen pérdidas en los aislamientos y pérdidas en pantallas o cubiertas metálicas.

PÉRDIDAS EN LOS CONDUCTORES

Las pérdidas por efecto Joule son función del cuadrado de la corriente que circula por el conductor, y en términos de potencia, se calculan con la ecuación:

$$W_C = R_{CA} \times I^2 \times 10^{-3} \; KW/Km$$

Donde:

I = Corriente en amperes

RCA = Resistencia del conductor en C.A. en ohms/Km

Si se trata de hacer cálculos por períodos de tiempo determinados (1 año), en términos de energía, entonces se puede usar la ecuación:

$$P_C = W_C \times L \times N \times H \times F_P \; \frac{K_W - h}{año}$$

Donde:

WC = Pérdidas en KW-h

L = Longitud del cable o circuito en Km

N = Número de cables o circuitos del sistema

H = Horas efectivas de operación del sistema (sin considerar mantenimiento, paros programados, etc.)

F_P = Factor de pérdidas

$$F_P = 0.3\,(F_C) + 0.7\,(F_C)^2$$

Fc = Factor de carga por unidad.

$$F_C = \frac{Horas\ efectivas}{8760}$$

TABLA 4.16

HORAS EFECTIVAS EN QUE SE PRESENTAN LAS PÉRDIDAS DE ACUERDO CON LA OPERACIÓN

Tipo de operación	Horas efectivas
a) Equipo de trabajo ocasional	0 -- 500
b) Carga irregular durante un turno	500 --1500
c) Carga irregular en varios turnos	1500 -- 3500
d) Carga uniforme en varios turnos	3500 -- 7000
e) Carga plena ocasionalmente desconectada	7000 -- 8000
f) Carga plena conectada permanentemente	8760

PÉRDIDAS EN EL DIELÉCTRICO

En los dieléctricos sometidos a una diferencia de potencial, se presenta una circulación de corriente activa entre los puntos de la diferencia de potencial, de modo que las pérdidas en el aislamiento de un cable de energía, dependen fundamentalmente de las características del material, como son la permitividad del dieléctrico y su factor de potencia, que se relacionarán a través de la ecuación:

$$Wd = 2\,\pi\,f\,c\,E_N^{\,2}\,tan\delta\,x\,10^{-3}\ Kw/Km$$

Donde:

f = Frecuencia en Hertz.

EN = Voltaje de fase a neutro (volts).

Tan δ = Factor de pérdidas del aislamiento a la frecuencia y temperatura de operación.

La capacitancia (C), se calcula con la ecuación:

$$C = \frac{0.0241\,\varepsilon\,x\,10^{-6}}{log\,\frac{da}{dc}}\ F/Km$$

ε = Constante dieléctrica del aislamiento.

da = Diámetro sobre el aislamiento.

dc = Diámetro bajo el aislamiento.

En unidades de energía estas pérdidas se pueden expresar como:

$$P_d = W_d\,x\,L\,x\,N\,x\,H\ \ \frac{Kw-h}{año}$$

Wd = Pérdidas calculadas de acuerdo a la ecuación para tal fin.

L = Longitud en Km.

N = Número de cables del sistema.

H = Número de horas de operación efectiva en un año.

PÉRDIDAS EN LAS PANTALLAS O CUBIERTAS METÁLICAS

La corriente que circula por el conductor de un cable, induce a su vez una corriente por las pantallas o cubiertas metálicas, cuando están conectadas a tierra en sus extremos.

En forma similar al conductor, las pérdidas en la pantalla o cubierta, se deben al efecto Joule, es decir, se deben al paso de la corriente inductiva IP por un elemento metálico (pantalla) que presenta una resistencia RP. Estas pérdidas se expresan como:

$$W_p = D_p\,I_p^{\,2}\,x\,10^{-3}\ KW/Km$$

Donde:

WP = Pérdidas en la pantalla de un cable (KW/Km)

IP = Corriente que circula por la pantalla (amperes)

RP = Resistencia de la pantalla (ohms/Km)

El valor de la resistencia de la pantalla es constante y sólo se corrige por la temperatura de operación (10°C debajo de la del conductor). El valor de la corriente IP depende del valor de la corriente en el conductor, de la forma constructiva del cable y de la disposición o separación entre los cables del sistema.

Dependiendo de la corriente en el conductor, el valor de la corriente IP que circula por las pantallas para cables unipolares en sistemas monofásicos o trifásicos en disposición en triángulo equilátero, se obtiene con la expresión:

$$I_P^2 = \frac{I^2 X_M^2}{X_M^2 + R_P^2} (Amperes)^2$$

Donde:

I = Corriente en el conductor en amperes

XM = Reactancia mutua entre el conductor y la pantalla

RP = Resistencia de la pantalla a la temperatura de operación

$$X_M = 2\pi f \left[2 \times 10^{-4} \ln \frac{D}{ro} \right]$$

$$X_M = 0.0754 \ln \frac{D}{ro} \frac{ohm}{Km}$$

Donde:

D = Distancia o separación entre centros de cables (cm).

ro = Radio medio de la pantalla (cm).

Para otra disposición de los conductores, la magnitud de IP, se debe calcular para cada cable del sistema, y entonces las pérdidas de éste se obtienen como:

$$W_P = \left(\sum_{i=1}^{n} I_{Pi}^2 \right) \times R_P \times 10^{-3} \; KW/Km$$

Donde:

n = Número de cables para los cuales se calculan las pérdidas

I_{Pi}^2 = Corriente que circula por cada cable de la pantalla

Ejemplo

Se alimenta a una fábrica que tiene una carga instalada de 10 MVA a 23 KV con un cable Vulcanel EP, 25 KV del No. 4/0 AWG, con una longitud de 100 m y el conductor es cobre. La instalación del cable es directamente enterrado en configuración trébol, el factor de carga es 75%, la temperatura ambiente es de 25°C en el terreno y su resistividad de 120°C - cm/W. Calcular las pérdidas de energía por año.

Solución

La corriente que demanda la carga es:

$$I = \frac{10000}{\sqrt{3} \times 23} = 251A$$

De la gráfica de corriente, para el conductor Vulcanel EP 25KV, para las condiciones supuestas.

Para conductor 4/0 a 20° $R_{CD} = \rho \frac{L}{A} = \frac{17.241}{107.21} = 0.1608\ ohm/Km$

Corrección por cableado:

$$R_{CD20°C} = 0.1608 \times 1.02 = 0.16403\ \Omega/Km$$

A la temperatura de operación:

$$R_{CD90°C} = 0.16403\left[1 + 0.00393(90 - 20)\right] = 0.209\ \Omega/Km$$

Corrigiendo por efecto piel y por unidad:

$$R_{CA90°C} = 0.210\ \Omega/Km$$

1) Pérdidas en el conductor:

$$W_C = I^2 \times R_{CA} \times 10^{-3}\ \frac{K_W}{Km}$$

$$W_C = (251)^2 \times 0.210 \times 10^{-3}$$

$$W_C = 13.23\ \frac{K_W}{Km}$$

En términos de la energía:

$$P_C = W_C \times L \times N \times H \times F_P$$

Donde:

$$F_P = 0.3(0.75) + 0.7(0.75)^2 = 0.619$$

$$P_C = 13.23 \times 0.1 \times 3 \times 8000 \times 0.619 = 19654.488\ \frac{KW - n}{año}$$

2) Pérdidas en el dieléctrico:

$$W_d = 2\pi fC E_N^2 tan\,\delta \times 10^{-3}\ \frac{KW}{KM}$$

Siendo:

$$C = \frac{0.0241 \times \varepsilon}{log\frac{da}{dc}} \times 10^{-6} F/Km$$

De las características para el conductor Vulcanel-EP:

$\varepsilon = 2.6$

$tan\delta = 1.5\%$

$da = 26.8mm$

$dc = 13.3mm$

$$C = \frac{0.0241 \times 2.6}{log\frac{26.8}{13.3}} \times 10^{-6} = 2.059 \times 10^{-7}\ \frac{F}{Km}$$

$$E_N = \frac{25}{\sqrt{3}} = 14.43KV\ al\ neutro$$

$$Wd = 2\pi \times 60 \times 2.059 \times 10^{-7} \times (14430)^2 \times 0.015 \times 10^{-3}$$

$$Wd = 0.242\ \frac{K_W}{Km}$$

En términos de la energía:

$$Pd = Wd \times L \times N \times H \times F_P$$

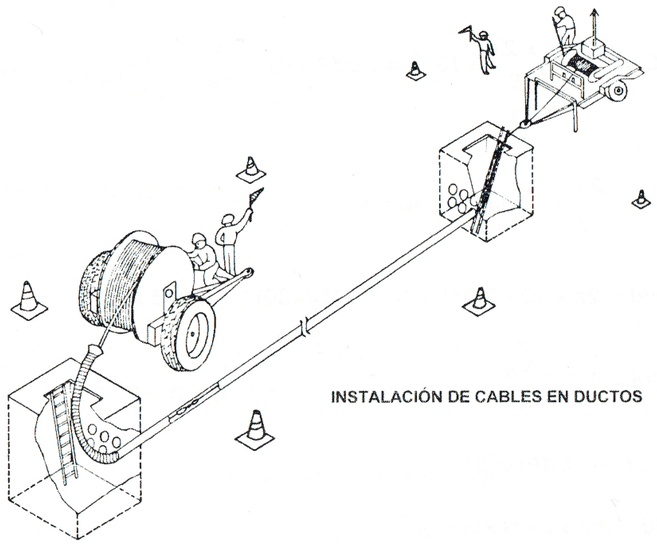
$$Pd = 0.242 \times 0.1 \times 3 \times 8000 \times 0.619$$

$$Pd = 359.515 \frac{Kw - h}{Km}$$

4.14 INSTALACIÓN DE CABLES SUBTERRÁNEOS

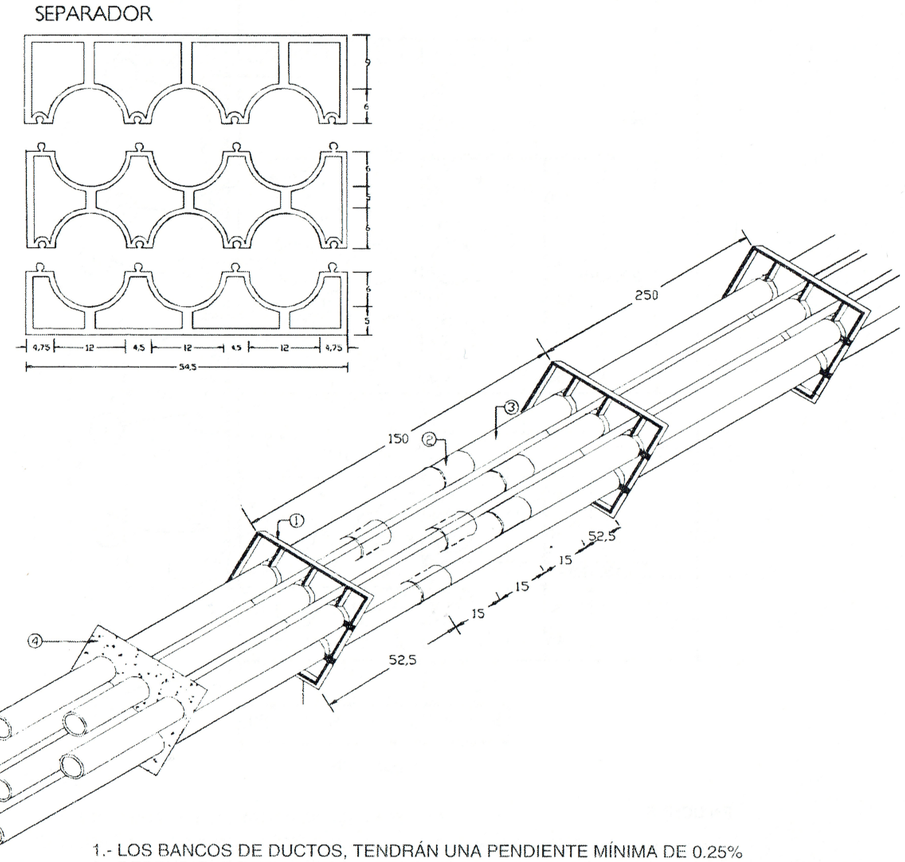
Los cables en ductos subterráneos es un tipo de instalación que es la más común ya que se aplica a sistemas de distribución comercial y en sistemas industriales, es normalmente un tipo de instalación flexible en la que la rapidez y facilidad para efectuar los cambios en caso de reparaciones o ampliaciones es importante. Cuando se requiera atravesar con el sistema de cables zonas construidas, caminos o donde no sea posible abrir zanjas, la instalación de cables en ductos subterráneos es la mejor alternativa.

Los sistemas de ductos subterráneos, deben seguir frecuentemente trayectorias rectas entre sus extremos, cuando existen cambios de dirección o trayectoria, se hacen por medio de pozos de visita que tengan las dimensiones apropiadas para hacer maniobras.



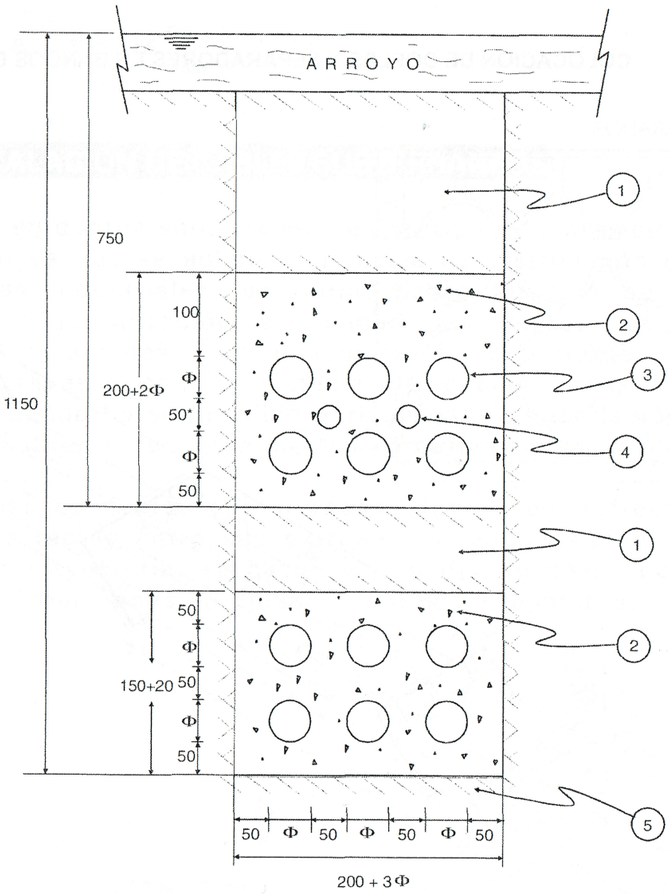
INSTALACIÓN DE CABLES EN DUCTOS

COLOCACIÓN DE COPLES Y SEPARADORES EN BANCOS DE DUCTOS



1.- LOS BANCOS DE DUCTOS, TENDRÁN UNA PENDIENTE MÍNIMA DE 0.25%
2.- DEPENDIENDO DE LA DISTANCIA ENTRE LAS ESTRUCTURAS POZOS, REGISTROS, BÓVEDAS, ETC.) Y DE LOS OBSTÁCULOS ENCONTRADOS EN EL TERRENO, SE SECCIONARÁ EL TIPO DE PENDIENTE MÁS ADECUADA.

BANCO DE DUCTOS DE PVC PARA MEDIA Y BAJA TENSIÓN BAJO ARROYO

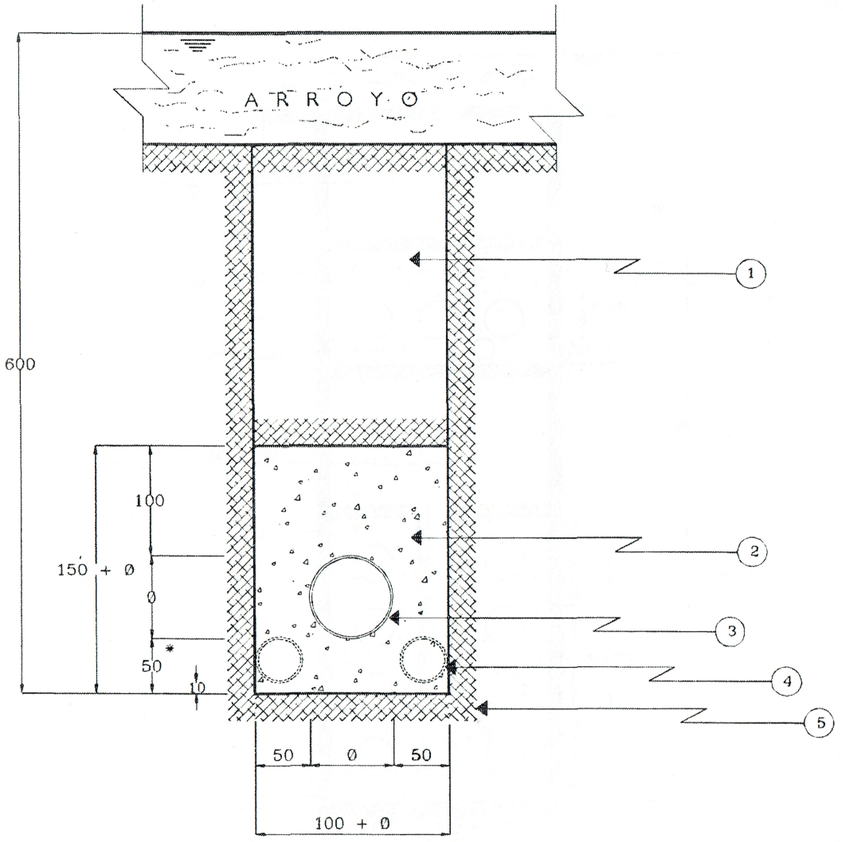


EN DONDE:

1.- RELLENO MATERIAL COMPACTADO (90% MÍNIMO)
2.- CONCRETO F'c=9806.65 kPa (100 Kg/cm^2) AGREGADO MÁXIMO 19.1 mm
3.- DUCTO DE PVC 76 ó 101 mm. DE Φ
4.– DUCTO DE PVC 38.1 ó 50.8 mm DE Φ (TV ó TELÉFONO)
5.- PISO COMPACTADO (95% MÍNIMO) POZOS DE VISITA A UTILIZAR: X, P, L, ó T.

*Cuando se utilicen ductos para TV o teléfonos, este espesor y la profundidad total del banco de baja tensión deben incrementarse en 60 mm.

BANCO DE DUCTOS DE PVC PARA BAJA TENSIÓN BAJO ARROYO

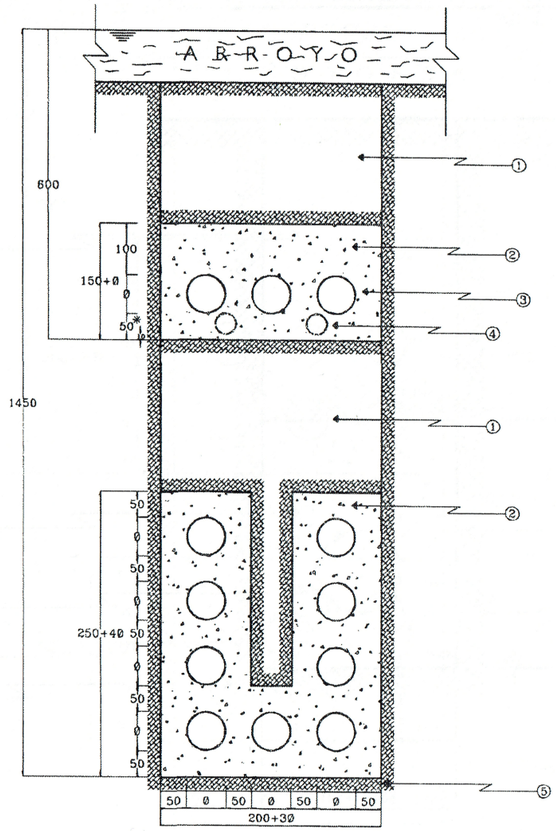


EN DONDE:

1.- RELLENO MATERIAL COMPACTADO (90% MÍNIMO)
2.- CONCRETO F'c=9806.65 kPa (100 Kg/cm^2) AGREGADO MÁXIMO 19.1 mm
3.- DUCTO DE PVC 76 ó 101 mm. DE Φ
4.– DUCTO DE PVC 38.1 ó 50.8 mm DE Φ (TV ó TELÉFONO)
5.- PISO COMPACTADO (95% MÍNIMO) POZOS DE VISITA A UTILIZAR: X, P, L, ó T.

*Cuando se utilicen ductos para TV o teléfonos, este espesor y la profundidad total del banco de baja tensión deben incrementarse en 50 mm.

BANCO DE DUCTOS DE PVC PARA MEDIA Y BAJA TENSIÓN BAJO ARROYO

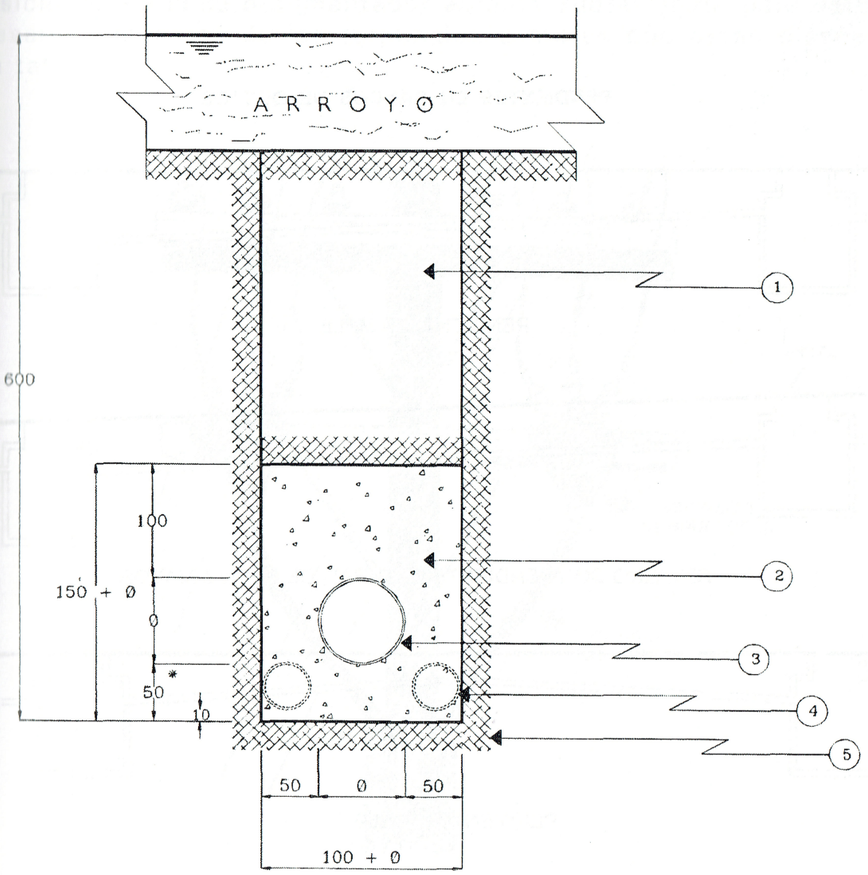


EN DONDE:

1.- RELLENO MATERIAL COMPACTADO (90% MÍNIMO)
2.- CONCRETO F'c=9806.65 kPa (100 Kg/cm^2) AGREGADO MÁXIMO 19.1 mm
3.- DUCTO DE PVC 76 ó 101 mm. DE Φ
4.– DUCTO DE PVC 38.1 ó 50.8 mm DE Φ (TV ó TELÉFONO)
5.- PISO COMPACTADO (95% MÍNIMO) POZOS DE VISITA A UTILIZAR: X, P, L, ó T.

*Cuando se utilicen ductos para TV o teléfonos, este espesor y la profundidad total del banco de baja tensión deben incrementarse en 50 mm.

BANCO DE DUCTOS DE PVC PARA BAJA TENSIÓN BAJO ARROYO

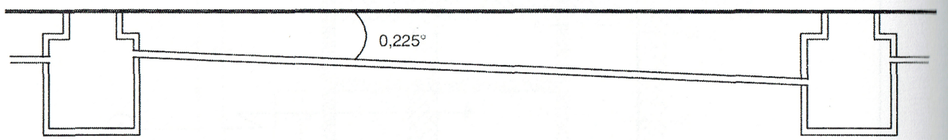


EN DONDE:

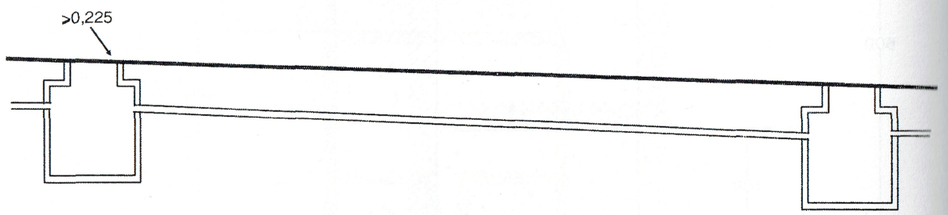
1.- RELLENO MATERIAL COMPACTADO (90% MÍNIMO)
2.- CONCRETO F'c=9806.65 kPa (100 Kg/cm^2) AGREGADO MÁXIMO 19.1 mm
3.- DUCTO DE PVC 76 ó 101 mm. DE Φ
4.– DUCTO DE PVC 38.1 ó 50.8 mm DE Φ (TV ó TELÉFONO)
5.- PISO COMPACTADO (95% MÍNIMO) POZOS DE VISITA A UTILIZAR: X, P, L, ó T.

*Cuando se utilicen ductos para TV o teléfonos, este espesor y la profundidad total del banco de baja tensión deben incrementarse en 50 mm.

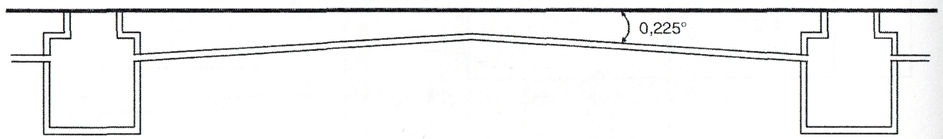
PENDIENTES EN BANCOS DE DUCTOS



PENDIENTE SIMPLE



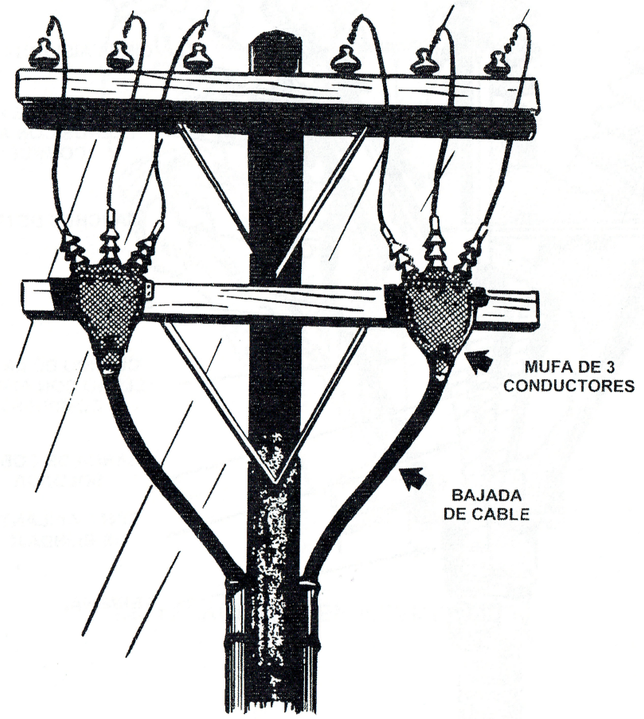
TERRENO CON PENDIENTE NATURAL, DE 0.25% ó MAYOR



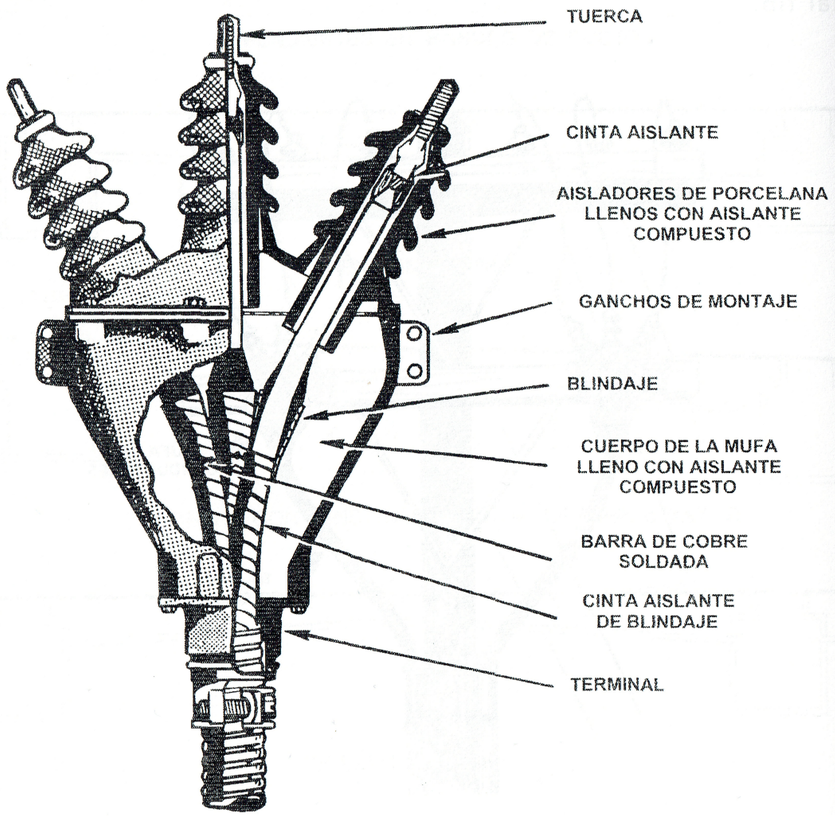
PENDIENTE DOBLE

1.- LOS BANCOS DE DUCTOS, TENDRÁN UNA PENDIENTE MÍNIMA DE 0.25%.
2.- DEPENDIENDO DE LA DISTANCIA ENTRE ESTRUCTURAS (POZOS, REGISTROS, BÓVEDAS, ETC,) Y DE LOS OBSTÁCULOS ENCONTRADOS EN EL TERRENO, SE SELECCIONARÁ EL TIPO DE PENDIENTE MÁS ADECUADA.

La instalación de cables subterráneos requiere frecuentemente de transiciones de línea o alimentador aéreo a subterráneo, para esto es necesario hacer uso de las terminales o mufas que están diseñadas para tal fin.

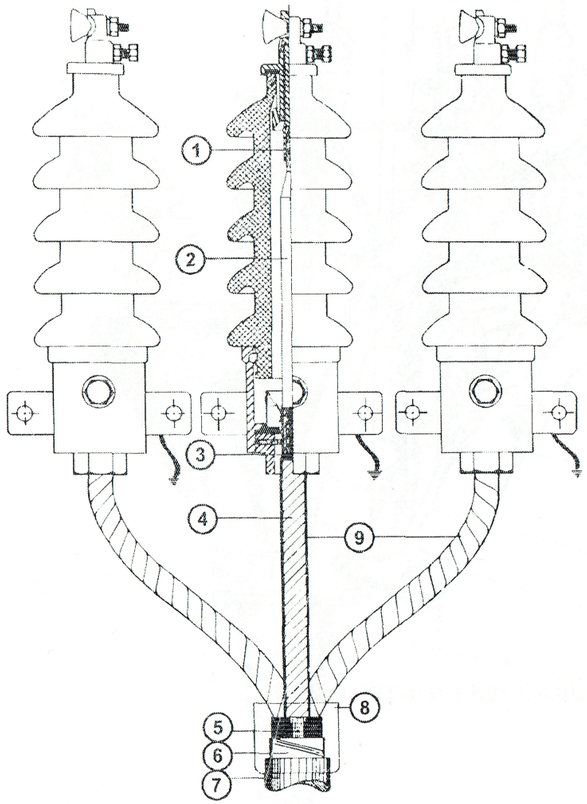


MUFAS MOSTRANDO LA TRANSICIÓN DE LÍNEA AÉREA A CABLE SUBTERRÁNEO



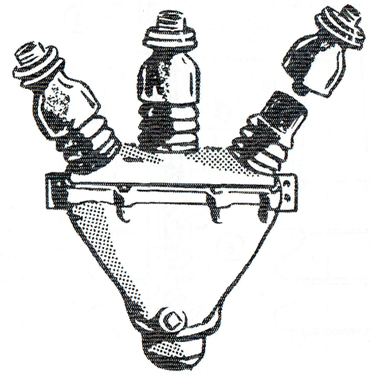
SECCIÓN TRANSVERSAL DE UNA MUFA

INSTALACIONES EN INTEMPERIE



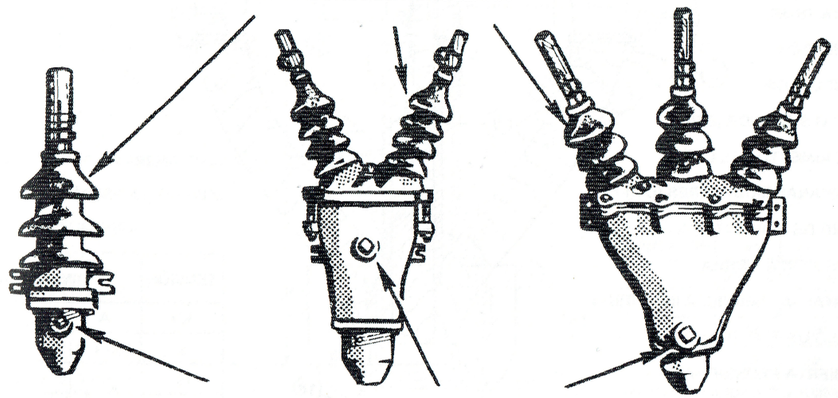
1.- CONDUCTOR
2.- AISLAMIENTO DEL CABLE
3.- SOLDADURA DE ESTAÑO
4.- PANTALLA ELÉCTRICA INDIVIDUAL
5.- CUBIERTA REUNIDORA
6.- ARMADURA DE ACERO
7.- CUBIERTA EXTERIOR
8.- SELLO DE RESINA EPÓXICA
9.- CINTA TRISIL

TERMINAL EN CABLE TRIFÁSICO



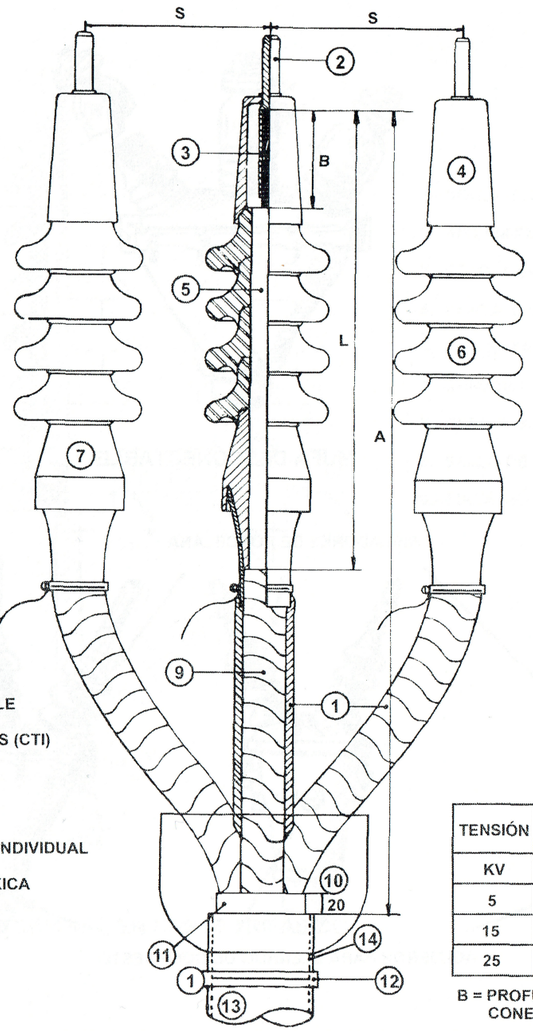
MUFA DESCONECTABLE

AISLADORES DE PORCELANA



AGUJEROS PARA LLENADO DE COMPUESTO

MUFA PARA UNO, DOS Y TRES CONDUCTORES

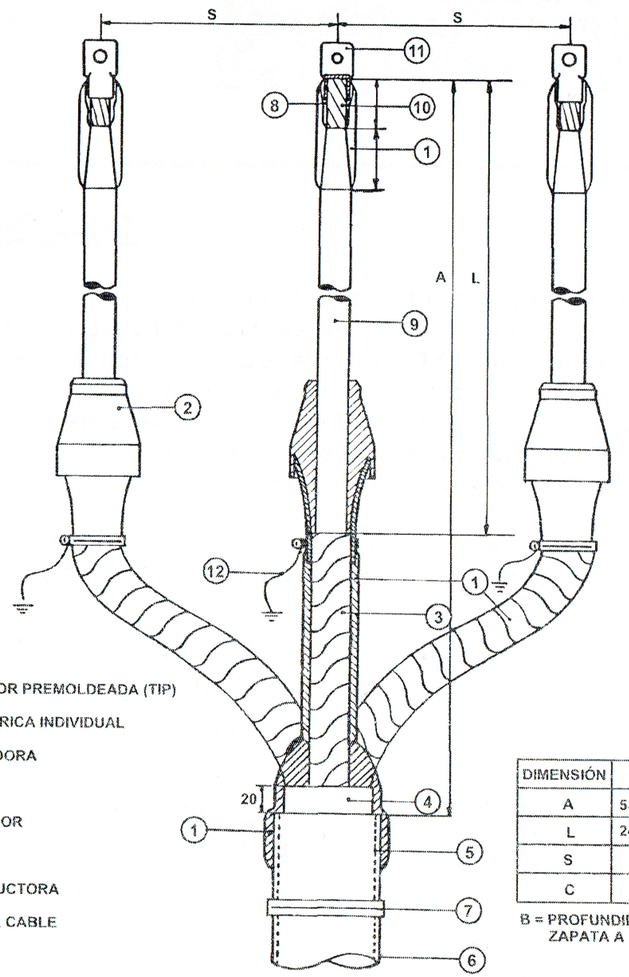


1.- CINTA TRISIL
2.- CONECTOR
3.- CONDUCTOR
4.- SELLO SUPERIOR (STI)
5.- AISLAMIENTO DEL CABLE
6.- CAMPANAS MODULARES (CTI)
7.- CONO DE ALIVIO (TIP)
8.- CONEXIÓN A TIERRA
9.- PANTALLA ELÉCTRICA INDIVIDUAL
10.- SELLO DE RESINA EPÓXICA
11.- CUBIERTA REUNIDORA
12.- ABRAZADERA
13.- CUBIERTA EXTERIOR
14.- FLEJE DE ACERO

TENSIÓN	DIMENSIÓN		
KV	A	L	S
5	530 + B	215 + B	60.0
15	655 + B	254 + B	175.0
25	780 + B	328 + B	280.0

B = PROFUNDIDAD DEL BARRIL DEL CONECTOR + 10 mm

TERMINAL TMI EN CABLE TRIFÁSICO



1.- CINTA BI-SEL
2.- TERMINAL INTERIOR PREMOLDEADA (TIP)
3.- PANTALLA ELÉCTRICA INDIVIDUAL
4.- CUBIERTA REUNIDORA
5.- FLEJE DE ACERO
6.- CUBIERTA EXTERIOR
7.- ABRAZADERA
8.- CINTA SEMICONDUCTORA
9.- AISLAMIENTO DEL CABLE
10.- CONDUCTOR
11.- ZAPATA
12.- CONEXIÓN A TIERRA

DIMENSIÓN	5 kV	15 kV	20 kV
A	530 + B	655 + B	780 + B
L	245 + B	460 + B	570 + B
S	60	175	280
C	20	32	50

B = PROFUNDIDAD DEL CONECTOR ó ZAPATA A SER UTILIZADA + 10 mm

TERMINAL TMI EN CABLE TRIFÁSICO